

ROSPHERE: Diseño, Construcción y Aplicación de una Esfera Robótica



Juan David Hernández Vega

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

Universidad Politécnica de Madrid

Tesis presentada como requisito para optar al título de

Máster en Automática y Robótica

2012

1. Revisor:

2. Revisor:

3. Revisor:

Día de la defensa:

Firma del jefe del comité del Máster:

Resumen

Este trabajo fin de máster presenta la concepción, diseño, modelado, simulación y construcción de un robot móvil terrestre con forma esférica, el cual presenta un mecanismo alternativo de locomoción respecto a opciones tradicionales como son los vehículos con ruedas, orugas, extremidades, etc. El sistema denominado ROSPHERE (“*RObotic SPHERE*”), está compuesto por una coraza o cuerpo exterior de forma esférica y un mecanismo interno que le permite autoinducir movimiento.

El proyecto ha sido desarrollado en concordancia con las líneas de investigación del Grupo de Robótica y Cibernética de la Universidad Politécnica de Madrid, adscrito al Centro de Automática y Robótica (CAR, UPM-CSIC), y ha sido económicamente soportado por proyectos de ámbito nacional e internacional, en los cuales algunas características propias del robot han realizado aportes en las tareas y requerimientos asignados al grupo ya mencionado. Algunos de los contextos donde se ha evaluado y/o se encuentra en evaluación el sistema, incluyen tareas de vigilancia e inspección de grandes infraestructuras, monitorización de cultivos y otras tareas propias de la agricultura de precisión, así como la realización de tareas de monitorización y registro de variables en áreas que involucren la interacción con personas, como playas, parques, etc.

El cuerpo esférico del robot, junto con su mecanismo interno de movimiento, dotan al sistema de características que marcan un punto de referencia y ventaja frente a otras plataformas móviles. Entre estas características se pueden destacar un punto único de contacto (sobre superficies rígidas) que implica menor fricción, estabilidad, maniobrabilidad, versatilidad, interacción segura en entornos con personas, robustez y capacidad de recuperación a colisiones, etc.

Desde la perspectiva teórica, este trabajo sintetiza los modelos físicos y matemáticos necesarios para entender el comportamiento general del sistema. Para esto se ha desarrollado un simulador que permite estudiar la dinámica del robot en desplazamientos rectos y curvos, lo que ha aportado un punto de partida en la selección de parámetros de diseño del robot y ha facilitado la iteración en los procesos de mejora del mismo.

En cuanto a la mecánica, tras el un análisis de diferentes alternativas, se ha optado por el uso de un mecanismo interno pendular de dos grados de libertad (GdL), el cual permite desbalancear el sistema y, consecuentemente, inducirle movimiento. Se presentan dos versiones del robot que cuentan con dicho mecanismo interno, uno de éstos es el resultado del refinamiento del otro.

En cuanto a software y hardware se refiere, se han diseñado arquitecturas de bajo y alto nivel en ambos casos. Respecto al hardware de bajo nivel, se ha utilizado un microcontrolador que realiza interfaz directa con los actuadores (dos servomotores), así como los diferentes sensores propioceptivos (IMU, GPS, etc.) y exteroceptivos (temperatura, humedad, luminosidad, etc.). El hardware de alto nivel, por otra parte, está constituido por sistema de cómputo embebido. Respecto al software, se presenta el desarrollo de rutinas en C (bajo nivel) y Python (alto nivel) que se relacionan de manera directa con las capas de hardware.

Finalmente, se presentan las pruebas del sistema robótico, con las cuales se evalúan, cuantifican y demuestran las capacidades del robot para desplazarse en diferentes superficies, en terrenos planos y con pendientes, así como su uso como un sensor móvil de variables ambientales, tales como temperatura, humedad y luminosidad, en diferentes entornos.

A Dios, por darme fortaleza en los momentos que más la he necesitado y
cuidar de mi familia en mi ausencia . . .

A mi madre, mi Gata, por tus consejos, por tu apoyo incondicional sin
importar el tiempo y la distancia, por dar todo por mis sueños, por hacer
de mi el hombre que soy .. simplemente, gracias por TODO.

A mi Gatos, Agustín Escobar Vega (q.e.p.d), por ser un padre y un amigo,
por tu ingeniería, por ser mi gran mentor, por enseñarme que siempre
todo saldrá bien y que todos los conflictos son negociables .. por creer en
mi .. espero que esto lo estés disfrutando desde el infinito.

A mi hermana, mi negra, por tu alegría y carisma, por no dejarme caer,
por motivarme a luchar por lo que quiero, por empujarme a tomar riesgos
.. siempre serás el mejor de los regalos y recuerdos de mi Gatos ..
estaré ahí siempre para ti.

A Julie, ojitos, por ser la coincidencia más linda que me ha ocurrido en
este viaje, por tus miradas y sonrisas cuando más las he necesitado, por
motivarme y apoyarme en mis decisiones, por tu dedicación, disciplina y
responsabilidad, han sido ejemplo y motivación .. espero que nos
acompañemos en este proceso que continúa.

Agradecimientos

Quisiera expresar mis agradecimientos a:

Al Prof. Antonio Barrientos, por ser un gran maestro, tutor, pero ante todo un amigo. Su motivación y disposición en todo momento han sido determinantes para la iniciación y continuación de este proceso de formación. Gracias por permitirme ser parte del grupo de Robótica y Cibernética (RobCib).

Al Dr. Jaime del Cerro, por su apoyo y colaboración como tutor durante todo el desarrollo de este proyecto, siempre atento y disponible para aportar, sugerir y resolver incluso las preguntas más triviales del mundo de la robótica.

A los miembros del grupo de Robótica y Cibernética (RobCib), mi familia en España. En especial quisiera agradecer a Leandro, compañero de estudios y charlas sobre los proyectos y dificultades de todo tipo. A David Sanz, por sus consejos y motivación. A Jorge Barrientos, por su dedicación y grandes aportes al desarrollo de este proyecto. Gracias a los demás miembros con los que comparto el día a día ... Mario, Joao, David Zapata, Nerea, Miguel Ángel, Claudio, Erik, Stathis, William.

A dos miembros de nuestro grupo y amigos desde Colombia, Julián Colorado y Antonio Matta, por facilitar un primer contacto y ayudarme en el proceso de adaptación. Por los buenos años del GAR (Grupo de Automática y Robótica, U. Javeriana, Cali-Colombia).

A mis amigos y familiares en Colombia y otras partes del mundo, por estar siempre ahí para escucharme y acompañarme en la distancia ... Joha, Clau, Carito, Angie, Nena, Cata, Xime, Lina, Diana, Vic ... gracias por estar ahí para mí.

Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1. Marco de desarrollo del proyecto	4
1.2. Motivación	6
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo principal	7
1.3.2. Objetivos específicos	7
1.4. Estructura del trabajo	8
2. Esferas robóticas: estado del arte	11
2.1. Principio básico de locomoción	11
2.2. Clasificación según el mecanismo interno	12
2.2.1. Cuerpo central con muelle	13
2.2.2. Coche interno de locomoción	14
2.2.3. Masa pendular con eje fijo	15
2.2.4. Masa pendular con eje móvil	16
2.2.5. Masas móviles	17
2.2.6. Comparación de alternativas de mecanismo interno	19
2.3. Aportaciones en modelado, simulación y control	20
2.3.1. Cinemática y dinámica	20
2.3.2. Control y planificación de trayectorias	22
2.4. Aplicaciones	23

ÍNDICE GENERAL

3. ROSPHERE: diseño mecánico y prototipos	27
3.1. Configuración mecánica seleccionada	27
3.2. Concepto mecánico general	29
3.3. Diseño y construcción de prototipos reales	31
3.3.1. Versión 0.1	31
3.3.1.1. Cuerpo esférico y base flotante del robot	32
3.3.1.2. Cuerpo central	32
3.3.1.3. Cuerpo masa-pendular	33
3.3.2. Versión 0.2	37
4. ROSPHERE: modelado y simulación	39
4.1. Modelo cinemático	39
4.1.1. Modelo cinemático: cuerpo esférico como base flotante	40
4.1.2. Modelo cinemático: mecanismo interno	45
4.2. Modelo dinámico	46
4.2.1. Dinámica de marcha	46
4.2.1.1. Dinámica de marcha: desarrollo matemático	48
4.2.1.2. Dinámica de marcha: descripción geométrica de los cuerpos	50
4.2.2. Dinámica de giro	52
4.3. Sistema de simulación	53
5. ROSPHERE: Arquitecturas hardware y software	55
5.1. Arquitectura hardware	55
5.1.1. Conexiones de bajo nivel	56
5.1.1.1. Procesador	57
5.1.1.2. Sensores	57
5.1.1.3. Actuadores	59
5.1.1.4. Baterías	59
5.1.2. Conexiones de alto nivel	59
5.1.2.1. Sistema de cómputo embebido	60
5.1.2.2. Sistemas de comunicación	60
5.1.3. Interconexión bajo y alto nivel	61
5.2. Arquitectura software	62

ÍNDICE GENERAL

5.2.1. Procesamiento de bajo nivel	62
5.2.1.1. Generalidades del firmware	63
5.2.1.2. Extensiones realizadas sobre el firmware	63
5.2.1.3. Partes necesarias para la expansión del firmware	64
5.2.2. Procesamiento de alto nivel	65
5.2.2.1. Sistemas operativos Linux y la evaluación del uso del Sistema Operativo de Robots (ROS)	65
5.2.2.2. Lenguajes y paradigmas de programación	66
5.2.2.3. Interfaz de teleoperación	66
5.2.3. Interconexión	66
6. Pruebas y resultados	69
6.1. Conjunto de pruebas 1: Validación de movimientos y adquisición sensorial.	69
6.2. Conjunto de pruebas 2: Interacción segura con personas.	70
6.3. Conjunto de pruebas 3: Versatilidad y adaptabilidad a diferentes terrenos.	72
6.4. Conjunto de pruebas 4: Desempeño global en tareas de monitorización de variables ambientales.	73
7. Conclusiones y trabajos futuros	77
7.1. Conclusiones	77
7.2. Trabajos Futuros	78
A. Cálculo de los parámetros de masa	81
A.1. Momentos de inercia	81
A.1.1. Momento de inercia de un cilindro	82
A.1.2. Momento de inercia de un paralelepípedo	82
A.1.3. Momento de inercia de una esfera hueca	83
A.2. Centro de masa	84
B. Operadores Espaciales	85
C. Extensiones y modificaciones del firmware	89
D. Planos de piezas de plástico de los prototipos	93
Referencias	101

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras

3figure.caption.4	
1.2. Concepto general de una esfera robótica, la cual está compuesta por un cuerpo esférico exterior y una Unidad Interna de Locomoción (UIL), la cual permite modificar la posición del centro de masa y, consecuentemente, inducir movimiento en el sistema.	4
12figure.caption.6	
13figure.caption.7	
15figure.caption.8	
16figure.caption.9	
17figure.caption.10	
2.6. Rollo, esfera robótica tipo <i>masa pendular con eje móvil</i> . Cuenta con un sistema pendular interno de dos GdL, pero su eje central no es fijo, sino que rota en sentido perpendicular.	18
18figure.caption.12	
25figure.caption.14	
28figure.caption.15	
3.2. Concepto general de ROSPHERE. Donde <i>a)</i> es un cuerpo esférico externo, <i>b)</i> un eje principal fijo al cuerpo esférico, <i>c)</i> una unidad interna de locomoción y <i>d)</i> el pendular o masa colgante.	30
3.3. ROSPHERE v0.0. Diseño 3D inicial del mecanismo interno de la esfera robótica.	30
3.4. Esfera de plástico de 32cm utilizada en ROSPHERE.	32
33figure.caption.19	
34figure.caption.20	

ÍNDICE DE FIGURAS

35figure.caption.21	
36figure.caption.22	
38figure.caption.23	
4.1. Entorno de simulación 3D que permite visualizar el comportamiento dinámico de ROSPHERE. Esta representación presenta mediante una animación la solución de las ecuaciones de movimiento del sistema, incluyendo la descripción física de los cuerpos que la conforman y el efecto de fricción de la esfera con la superficie de desplazamiento.	40
4.2. Marcos o sistemas de referencia de la base flotante dispuestos como lo sugiere Roy Featherstone en su librería de simulación de sistemas de cuerpos rígidos(51).	41
4.3. Diagrama cinemático de la esfera robótica del cual se pueden extraer los parámetros cinemáticos según la convención modificada de Denavit-Hartenberg (MDH).	45
47figure.caption.29	
4.5. Entorno de simulación realizando una trayectoria recta resolviendo la dinámica de marcha. Para realizar este tipo de simulaciones se restringe el movimiento de la esfera robótica hacia delante y atrás.	48
51figure.caption.31	
4.7. Entorno de simulación realizando visualizando el robot en una configuración típica de la dinámica de giro.	52
5.1. Robovero TM . Tarjeta electrónica principal de ROSPHERE que cuenta, entre otros elementos, con un microcontrolador embebido, una unidad de medida inercial, puertos para conexión de dispositivos de protocolos I2C, UART, SPI, PWM, etc. Ésta puede ser controlada desde un ordenador externo conectado a través de un puerto USB o mediante un ordenador embebido en la tarjeta.	56
59figure.caption.34	
5.3. Overo Fire [®] , sistema de cómputo embebido de alto nivel de ROSPHERE. Cuenta con un procesador a 720MHz, con 512MB RAM y sistema operativo Linux.	60

5.4. Arquitectura hardware de ROSPHERE. Se destaca la tarjeta Robovero TM , correspondiente a la capa de bajo nivel, así como el sistema Overo Fire [®] que corresponde a la capa de alto nivel. Se presentan las conexiones entre dichas capas, así como la de otros elementos como sensores y actuadores.	61
5.5. Interfaz gráfica de la estación remota de ROSPHERE. Esta interfaz es utilizada para operar el robot cuando éste se encuentra en modo de teleoperación. La interfaz permite controlar cada uno de los GdL del robot, así como visualizar los valores y estado de los sensores, incluyendo la IMU (Roll, Pitch, Yaw), temperatura y humedad relativa.	67
5.6. Arquitectura software de ROSPHERE. Está separada en la capa de cómputo de bajo y alto nivel, las cuales se relación de manera directa con la arquitectura hardware. La comunicación entre ambas capas se realiza mediante mensajes que son enviados por comunicación (USB). .	68
71figure.caption.39	
6.2. Conjunto de pruebas 2: Interacción segura con personas. ROSPHERE en contacto con una niña durante el registro de variables ambientales en el parque <i>El Retiro</i> en Madrid, España.	72
73figure.caption.41	
75figure.caption.42	
6.5. Conjunto de pruebas 4: Desempeño de tareas de monitorización perimetral. Se muestra el recorrido de ROSPHERE realizando el registro de variables ambientales en las instalaciones del Centro de Automática y Robótica (CAR, UPM-CSIC), en Arganda, Madrid. Este se considera como un escenario similar al de Grande Infraestructuras Exteriores (GIE). 76	
A.1. Parámetros necesarios para el cálculo del tensor de inercia de un cilindro.	82
A.2. Parámetros necesarios para el cálculo del tensor de inercia de un paralelepípedo.	82
A.3. Parámetros necesarios para el cálculo del tensor de inercia de una esfera hueca, como es el caso del cuerpo esférico del robot.	83

ÍNDICE DE FIGURAS

D.1. Sujeción Eje-Engranaje ROSPHERE v0.1. Pieza que permite sujetar uno de los engranajes al eje principal del robot.	93
D.2. Sujeción Eje-Esfera ROSPHERE v0.1. Pieza que permite sujetar cada extremo del eje principal al cuerpo esférico.	94
D.3. Parte inferior de la pieza central de ROSPHERE v0.1.	94
D.4. Parte superior de la pieza central de ROSPHERE v0.1. Sobre ésta se ubica el soporte del actuador del primer GdL (ver Figura D.5), la tarjeta principal Robovero TM y el sistema de cómputo embebido Overo Fire [®]	95
D.5. Soporte del actuador del primer GdL de ROSPHERE v0.1.	95
D.6. Sujeción-Servo2 ROSPHERE v0.1. Pieza para sujetar el servomotor del segundo GdL.	96
D.7. Horquilla ROSPHERE v0.1. Pieza de la cual cuelga la caja de masa pendular (ver Figura D.8) y gira respecto a la pieza central (ver Figuras D.3 y D.4) según lo define el segundo GdL.	96
D.8. Caja de masa pendular ROSPHERE v0.1. En ésta se ubican la batería del robot y masas adicionales que permiten alejar el Centro de Masa del sistema, respecto a su Centro Geométrico.	97
D.9. Mecanismo interno completo de ROSPHERE v0.1.	97
D.10. Sujeción Eje-Esfera ROSPHERE v0.2. Pieza que permite sujetar cada extremo del eje principal al cuerpo esférico. El material, y en consecuencia la masa, ha sido disminuido respecto a la versión 0.1 con el objetivo de alejar el Centro de Masa del robot.	98
D.11. Pieza central de ROSPHERE v0.2. Sobre ésta se ubican los dos actuadores del robot, la tarjeta principal Robovero TM y el sistema de cómputo embebido Overo Fire [®]	98
D.12. Masa pendular ROSPHERE v0.2. En ésta se ubican la batería del robot y masas adicionales que permiten alejar el Centro de Masa del sistema, respecto a su Centro Geométrico. Su forma hace que el CM esté más cerca del extremo interior del cuerpo esférico del robot.	99
D.13. Mecanismo interno completo de ROSPHERE v0.2.	99

Índice de tablas

2.1. Comparación de las diferentes alternativas del mecanismo interno de una esfera robótica de acuerdo a las siguientes características: C_1 =capacidad de sortear obstáculos, C_2 =Simplicidad constructiva, C_3 =Capacidad para superar pendientes, C_4 =Capacidad para superar obstáculos, C_5 =Eficiencia energética, C_6 =Maniobrabilidad	19
4.1. Valores articulares de la base flotante para el caso del caminante robótico.	42
4.2. Parámetros MDH del mecanismo interno de la esfera robótica	46

ÍNDICE DE TABLAS

1

Introducción

La robótica ha alcanzado un rol importante en nuestra sociedad, en gran parte por su papel fundamental en el desarrollo industrial. La creación de brazos manipuladores capaces de realizar tareas repetitivas, de manera rápida y con un nivel de precisión superior a la alcanzada por el ser humano, han hecho que los brazos robóticos sean un factor determinante en la productividad del sector de manufactura. Sin embargo, su principal desventaja radica en su limitada movilidad, que no solo reduce su espacio de trabajo, sino también la variedad de tareas que puede realizar.

Como una contraparte de los brazos manipuladores con una base fija, se han desarrollado sistemas robóticos capaces de desplazarse a lo largo de un espacio definido. Empezando por los vehículos de guiado automático (AGV, por sus siglas en inglés), que son sistemas capaces de seguir trayectorias o rutas predefinidas, las cuales son detectadas por el vehículo y sirven como referencia para su movimiento, hasta llegar a los vehículos terrestres no tripulados (UGV, por sus siglas en inglés), los cuales tienen sistemas de navegación que les permiten desenvolverse o explorar en terrenos parcial o completamente desconocidos, el desarrollo de este tipo de plataformas móviles autónomas cubre diferentes campos de aplicación.

Algunos de estos sistemas móviles han permitido ampliar el espacio de trabajo de brazos industriales convencionales, mediante la fijación de su base a una plataforma móvil (1), pero en la actualidad también se puede encontrar una importante variedad de desarrollos de robots móviles terrestres, los cuales son utilizados en aplicaciones no industriales, denominados también robots de servicio. Éstos sistemas son utilizados en aplicaciones como inspección (2), vigilancia y seguridad (3, 4), monitorización de

1. INTRODUCCIÓN

variables ambientales (5), exploración de entornos desconocidos (6, 7, 8), interacción con las personas (9), tareas domésticas (10), entre otras.

Los robots móviles terrestres pueden ser clasificados según su modo de locomoción en tres grupos: aquellos con extremidades, los que se desplazan con orugas y los que utilizan ruedas (11, 12). Del primero, se tienen los sistemas bípedos caminantes (ver Figura 1.1a), robots diseñados y construidos con características antropomorfas que tienen la capacidad de adaptarse a entornos de trabajo utilizados por el ser humano (*e.g.*, escaleras, pasillos, etc.), pero que tienen como grandes desventajas su alta inestabilidad y poca capacidad de recuperación en caso de colisiones (13). En este grupo también se ubican los robots cuadrúpedos y hexápodos, los cuales son más estables y con mayor adaptabilidad a diferentes terrenos; como desventaja se tiene el alto consumo energético por el elevado número de actuadores (14).

Por otra parte, los robots que utilizan orugas tienen como ventajas la adaptabilidad a diferentes terrenos, incluyendo la capacidad de subir y bajar escalones, y la versatilidad para superar obstáculos de diferentes tamaños (ver Figura 1.1b). Entre sus desventajas se encuentra ineficiencia energética, ya que a pesar de su gran tracción sobre diferentes terrenos, ésta se alcanza por la ampliación de la superficie de contacto, lo que a su vez implica una mayor fricción.

Finalmente, el grupo de los robots móviles con ruedas es, probablemente, donde mayor desarrollo se presenta. Este tipo de robots tiene como características principales la eficiencia energética en superficies planas y compactas (ver Figura 1.1c), menor desgaste sobre la superficie de desplazamiento, además de presentar una menor complejidad en su construcción (11, 15). A su vez, este grupo se subclasifica según la disposición de sus ruedas, presentándose configuraciones tales como Ackerman, triciclo básico, diferencial, skid steer, síncrona, omnidireccional, entre otras (12, 16).

Otra posible subclasificación general de los robots móviles es la holonomicidad. Esta es una característica que define las propiedades de locomoción de un vehículo respecto a su espacio de trabajo. Se define entonces un vehículo como holonómico, si el número de grados de libertad (GdL) controlables del vehículo es igual al número de GdL de su espacio de trabajo. Por otra parte, cuando el número de GdL controlables es menor, se define como vehículo no-holonómico (20). En general, el espacio de trabajo de un vehículo terrestre tiene 3 GdL, los referentes al desplazamiento en un plano X-Y y el

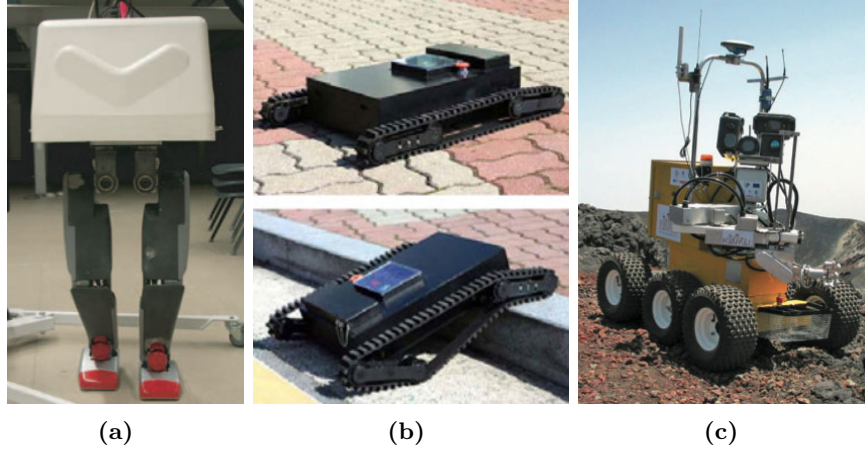


Figura 1.1: Clasificación de los robots móviles según el sistema de locomoción que utilizan. En (a) se presentan los miembros inferiores de un robot humanoide (HRP-2LT) desarrollado por Zhan *et al.* (17), el cual tiene la capacidad de correr. En (b) se presenta un robot tipo oruga (CALEB-2) desarrollado por Kwon *et al.* (18). En (c) se presenta un robot móvil de modo de locomoción con ruedas desarrollado por Muscato *et al.* (19), el cual es utilizado para exploración de volcanes.

ángulo de guiñada (Yaw). Un coche, por ejemplo, es un claro ejemplo de un vehículo no-holonómico, ya que no puede moverse lateralmente, sino que debe realizar una combinación de movimientos hacia delante/atrás y giros, como ocurre en una situación típica de estacionamiento.

Esta investigación presenta el estudio, diseño y construcción de una esfera robótica, la cual se puede considerar como un sistema móvil terrestre no-holonómico alternativo, que no se ajusta completamente a ninguna de las clasificaciones mencionadas previamente. Las esferas robóticas tienen como principio de locomoción la inducción de movimiento mediante la inestabilidad del sistema, la cual se logra por la variación de la ubicación del centro de masa (CM) general del mismo (ver Figura 1.2). Las esferas robóticas constan de dos partes principales, un cuerpo rígido exterior, o coraza de forma esférica, y un mecanismo interno de inducción de movimiento. Según este último, una esfera robótica puede comportarse como un sistema holonómico o como uno no-holonómico.

Las principales características de las esferas robóticas son su alta maniobrabilidad, buena estabilidad dinámica, baja resistencia con pérdidas mínimas de energía por

1. INTRODUCCIÓN

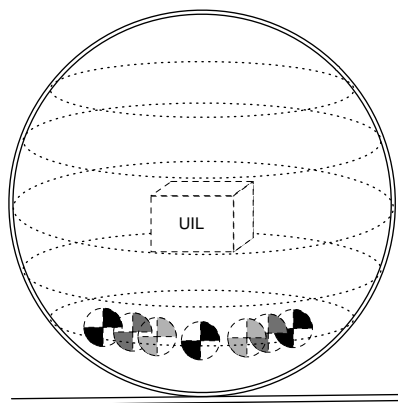


Figura 1.2: Concepto general de una esfera robótica, la cual está compuesta por un cuerpo esférico exterior y una Unidad Interna de Locomoción (UIL), la cual permite modificar la posición del centro de masa y, consecuentemente, inducir movimiento en el sistema.

fricción, ya que en superficies rígidas y compactas se presenta un único punto de contacto, robustez y versatilidad para desplazarse en diferentes terrenos. Además, debido a la forma esférica de su cuerpo exterior, este tipo de robots puede realizar rodamiento omnidireccional, tienen una alta capacidad de recuperación a colisiones (el robot difícilmente entra en configuraciones irrecuperables), además la electrónica del robot se ubica en el interior de dicho cuerpo esférico, sirviendo de protección contra polvo, agua e incluso en el caso de colisiones (21, 22).

1.1. Marco de desarrollo del proyecto

Este proyecto se ha desarrollado en el marco de actividades de investigación del Grupo de Robótica y Cibernética de la Universidad Politécnica de Madrid¹, adscrito al Centro de Automática y Robótica (CAR, UPM-CSIC). Dentro de sus líneas de investigación se incluyen el diseño y uso de sistemas robóticos en diferente áreas de aplicación, como tareas de vigilancia y seguridad, agricultura, sustitución sensorial, redes de sensores, implantación de sistemas robóticos en entornos urbanos, entre otras. El contexto específico de este proyecto de investigación está dado en tres de sus áreas de aplicación.

¹<http://www.robciib.etsii.upm.es/>

El punto de partida de esta investigación se dio en el proyecto “Robots Bioinspirados para actividades en materiales no compactados”, el cual ha sido financiado por parte de las *AYUDAS PARA APOYAR LAS LÍNEAS DE I+D EN EL PROGRAMA DE CREACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE GRUPOS DE INVESTIGACIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID*. En este proyecto se pretendía analizar y validar alternativas de robots bioinspirados que pudiesen realizar tareas de exploración y registro de variables físicas (*e.g.*, temperatura, humedad, etc.) sobre materiales de baja compactación (*e.g.*, compost, arena y silos de grano). Durante la revisión bibliográfica, se encontraron aportaciones relativas a esferas robóticas que cumplieran con algunas de las características y requisitos del proyecto, como la propuesta por Ylikorpi *et al.* (23). Sobre los resultados obtenidos en la evaluación y diseño de un primer prototipo, se han identificado otras aplicaciones coherentes con los intereses del grupo de investigación.

Por una parte, el grupo mencionado se encuentra desarrollando un proyecto a nivel nacional titulado “Sistemas Multirobot para la Protección de Grandes Infraestructuras Exteriores (GIE)” (DPI2010-17998). En este proyecto se plantea la necesidad de tener un Sistema Multi-Robot (SMR) compuesto por una flota de robots terrestres y aéreos, que trabajen de manera coordinada, cooperativa y complementaria para realizar tareas de inspección y vigilancia de las GIE (24).

Las GIE son aquellas infraestructuras de las cuales su incorrecto y/o discontinuo funcionamiento pueden afectar a los ciudadanos, su salud, seguridad o economía. Como ejemplos de las GIE se tienen las centrales hidroeléctricas, centrales nucleares, centros de comunicación, infraestructuras de transporte como aeropuertos, redes de ferrocarriles, redes transporte público, entre otras. En muchos de estos casos se propone utilizar un SMR para realizar tareas de vigilancia e inspección perimetral, donde los robots aéreos realizan una inspección global de los escenarios planteados y los robots terrestres se encargan de confirmar, delimitar o identificar el posible problema o amenaza. Es allí donde se ha evaluado (y se encuentra en evaluación) el uso de una esfera robótica, como una posible unidad terrestre dotada de elementos sensoriales capaz de realizar este tipo de recorridos.

Otro contexto en el que se ha desarrollado esta investigación es el proyecto europeo titulado “*Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management*”

1. INTRODUCCIÓN

(RHEA) (NMP-CP-IP 245986-2)¹, en el cual participa el grupo mencionado. El proyecto RHEA propone el uso de un SMR para realizar tareas de agricultura de precisión, donde nuevamente desempeña de manera coordinada, cooperativa y complementaria, tareas de medición e inspección, pero en este caso se incluyen funciones de actuación sobre los cultivos. El contexto de prueba seleccionado para la esfera robótica ha sido la medición de variables ambientales de cultivos (*e.g.*, temperatura, humedad, luminosidad, etc.), información que puede ser utilizada para realizar una actuación focalizada sobre los mismos, que bien sea mediante riegos de agua o el uso de pesticidas, siempre representará una minimización en costos ambientales y económicos.

Finalmente, el último contexto de desarrollo de este proyecto se da en el uso de sistemas robóticos en ambientes urbanos, considerando especialmente la capacidad de interacción segura del sistema robótico con personas, siendo éste uno de los mayores intereses en la actualidad en el desarrollo de los robots de servicio. En este caso, el grupo mencionado pretende desarrollar sistemas, como es el caso de las esferas robóticas, que cumplan con este requisito.

1.2. Motivación

Este trabajo está motivado por diferentes aspectos. Desde las perspectivas práctica y técnica, el desarrollo de este robot presenta la evaluación de una propuesta alternativa a los sistemas robóticos móviles convencionales, utilizando modos de locomoción y tracción diferentes que han demostrado ventajas y desventajas en diferentes aplicaciones. La capacidad de adaptación de una sola plataforma a diferentes terrenos, sin la necesidad de sacrificar aspectos de eficiencia energética, o sin que esto implique modificaciones en el robot, han sido factores determinantes para definir este proyecto como congruente con los intereses del grupo de investigación.

Otro aspecto técnico relevante y de interés es la posibilidad de utilizar las esferas robóticas como sensores móviles. Sus características de robustez, capacidad de recuperación a colisiones, maniobrabilidad, así como otras ya mencionadas, hacen que estos robots sean idóneos para la monitorización de entornos no estructurados.

Por otra parte, desde un enfoque teórico y de investigación, las esferas robóticas presentan particularidades que implican un análisis, extensión de soluciones existen-

¹<http://www.rhea-project.eu/>

tes, o incluso proposición de nuevos métodos para su modelado, simulación y control, respecto a los métodos usados en otros robot móviles convencionales. Por ejemplo la inestabilidad, como principio de fundamental para la inducción de movimiento, implica variaciones en modelos dinámicos ya definidos y ampliamente estudiados. Por otra parte, la posibilidad de tener un sistema holonómico o no holonómico (según el mecanismo interno utilizado), implica restricciones adicionales en problemas cinemáticos y de planificación de trayectorias del robot.

A pesar de lo mencionado previamente, es importante destacar que en una primera etapa del desarrollo de este proyecto, el esfuerzo de investigación se centró en el diseño, modelado y construcción, ya que una primera motivación era evaluar las capacidades de este tipo de robots. El resultado de esta evaluación ha permitido definir nuevas aplicaciones y posibilidades del mismo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo principal

El objetivo principal de este proyecto es concebir, diseñar, modelar, construir y controlar una esfera robótica con capacidad de monitorizar diferentes tipos de variables, considerando las capacidades necesarias para que éste forme parte de un Sistema Multi-Robot (SMR).

1.3.2. Objetivos específicos

- Seleccionar y mejorar una de las posibles configuraciones mecánicas existentes de esferas robóticas, analizando sus capacidades de movimiento y de instrumentación según los requerimientos de un SMR.
- Definir un modelo matemático que permita simular el comportamiento del sistema. Éste debe incluir aspectos dinámicos y cinemáticos que permitan evaluar el sistema desempeñando diferentes tipos de movimientos, incluyendo movimientos básicos como trayectorias rectas y cambios de dirección.
- Analizar y definir las arquitecturas hardware y software para el control de una esfera robótica que le permita integrarse a un SMR y desempeñar tareas de monitorización

1. INTRODUCCIÓN

- Definir métodos para la generación y seguimiento de trayectorias de una esfera robótica.
- Construir un prototipo de esfera robótica que cumpla con las especificaciones técnicas y mecánicas evaluadas en los objetivos anteriores. Esto debe incluir la construcción mecánica (estructura y motores) e implementación de las arquitecturas hardware y software (sensores, procesadores, módulos de comunicación, etc.).

1.4. Estructura del trabajo

Este documento presenta en orden secuencial las diferentes etapas de desarrollo de este proyecto, las cuales van relacionadas de manera directa con los objetivos planteados y mencionados previamente. Éste se divide en los siguientes capítulos:

En primer lugar, y posterior a esta introducción, el capítulo 2 presenta una revisión del estado del arte de las esferas robóticas existentes. En este capítulo se presentarán las diferentes alternativas de configuraciones mecánicas, así como una comparación de las ventajas y desventajas que cada una de ellas. También se mencionarán las formulaciones de los modelos cinemáticos y dinámicos existentes, así como algunas técnicas de control utilizados con este tipo de sistemas.

En el capítulo 3 se presenta el diseño de los prototipos de esferas robóticas construidas. En este capítulo se analizan los aspectos mecánicos del robot, lo que incluye la disposición de los grados de libertad, los tipos de actuadores seleccionados, así como el diseño CAD de las piezas que hacen parte del mecanismo interno.

En el capítulo 4 se presenta la información referente al modelado y simulación de una esfera robótica, que cumple con las especificaciones dadas en el capítulo 3. Para comenzar, se presenta un modelo cinemático y dinámico, el cual sintetiza diferentes modelos existentes y permite entender el comportamiento del sistema para el tipo de movimientos deseados. Como complemento, se presenta un simulador que permite visualizar movimientos básicos de la esfera robótica, como son el caso de rectas y curvas.

En el capítulo 5 se presentan las arquitecturas hardware y software del robot. En cuanto a hardware se refiere, este capítulo explica la disposición y función de los procesadores que posee el robot, así como la conexión con los diferentes sensores (propioceptivos y exteroceptivos) y actuadores. Por otra parte, la arquitectura software explica las diferentes capas de abstracción que procesan los datos. En primer lugar, se tiene una

capa que procesa las instrucciones de alto nivel recibidas por parte de un planificador o de un operario, mientras que otra capa es la encargada de obtener la información de los sensores mediante protocolos de comunicación de bajo nivel.

En el capítulo 6 se presentan las diferentes pruebas realizadas a la esfera robótica. Un primer grupo de pruebas ha sido concebido con el objetivo de cuantificar las capacidades del robot, lo que ha permitido definir especificaciones como tipos de terrenos, pendientes, ángulos de giro, etc. Un segundo grupo de pruebas ha sido realizado con el objetivo de validar la aplicación del sistema para realizar tareas de monitorización de diferentes tipos de variables, esto con el fin de verificar la utilidad del sistema en los contextos mencionados en este capítulo. Finalmente, se presenta un análisis de los resultados obtenidos en ambos grupos de pruebas.

Por último, el capítulo 7 presenta las conclusiones del desarrollo de este proyecto. Con base a los resultados obtenidos y junto con las conclusiones, se presentan posibles líneas de investigación que pueden indicar la continuación del desarrollo de este proyecto.

1. INTRODUCCIÓN

2

Esferas robóticas: estado del arte

Uno de los objetivos de esta investigación es presentar la aplicación de robots de cuerpo esférico, denominados en este documento como esferas robóticas, las cuales cuentan con un mecanismo interno de autoinducción de movimiento. El uso de este tipo de sistemas es relativamente reciente. Sus capacidades, pero en especial las aplicaciones que se les pueden dar, son aspectos aún en evaluación y hacen de estos sistemas un tópico interesante de investigación. A lo largo de este capítulo se hará una revisión general de los aspectos más relevantes del estado del arte de este tipo de robots. En primer lugar, se realizará un breve análisis de su principio fundamental de movimiento; luego se presentará la clasificación según el mecanismo interno de inducción de movimiento; también se mencionarán los aportes más significativos en cuanto a modelado, simulación y control del sistema; finalmente se nombrarán algunas de las aplicaciones más destacadas que se encuentran en la actualidad.

2.1. Principio básico de locomoción

Contrario a lo que ocurre con otros robots móviles en los cuales la estabilidad es el principio básico de locomoción (*e.g.*, sistemas caminantes), los movimientos en una esfera robótica son inducidos por inestabilidad. En primer lugar, considérese una esfera de masa uniformemente distribuida. En este caso, el centro de masa (CM) es coincidente con el centro geométrico (CG), por lo tanto si la esfera se encuentra en contacto con una superficie plana, la proyección del centro de masa sobre la superficie se producirá en

2. ESFERAS ROBÓTICAS: ESTADO DEL ARTE

dicho punto de contacto. Bajo estas condiciones, la esfera no tendrá aceleración, ni velocidad en ninguna dirección (*i.e.*, la esfera se encontrará en reposo) (ver Figura 2.1a).

Por otra parte, si una esfera fuese construida utilizando un material no uniforme, se podría afirmar que su CM no coincidiría con su CG. En este caso, si la esfera fuese ubicada en una superficie plana, la proyección del CM sobre la dicha superficie no coincidiría con el punto de contacto y, por lo tanto, la esfera rodaría hasta alcanzar una posición de equilibrio, en la que la proyección del CM coincidiera con el punto de contacto (ver Figura 2.1b).

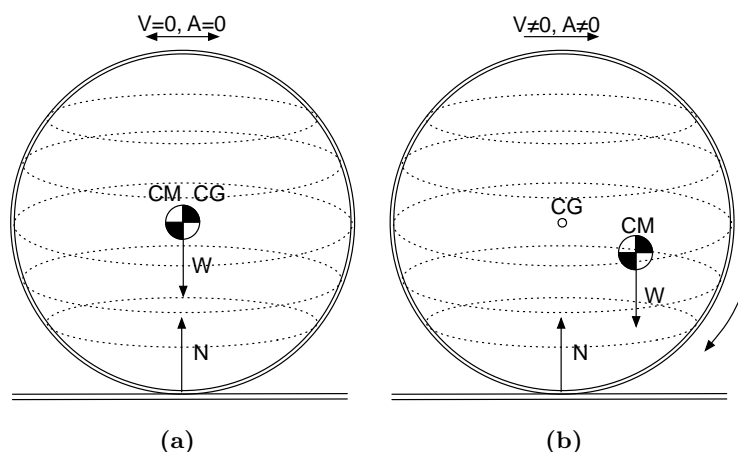


Figura 2.1: Principio básico de locomoción. La proyección del CM sobre la superficie define si la esfera tiene o no aceleración en alguna posible dirección de movimiento. (a) presenta la esfera en una configuración estable y sin movimiento. (b) presenta la esfera en una configuración inestable y con movimiento inducido.

Finalmente, si la distribución de masas (*i.e.*, la posición del CM) puede ser definida arbitrariamente, el sistema esférico se podría desestabilizar. Este es el principio básico de locomoción de estos sistemas robóticos, un vehículo de forma esférica que incluye un mecanismo interno, el cual le permite modificar la posición del CM y, consecuentemente, autoinducirse movimiento.

2.2. Clasificación según el mecanismo interno

A pesar de que las esferas robóticas no son plataformas móviles ampliamente utilizadas, es posible encontrar en la literatura aportaciones significativas para resolver

sus problemas cinemáticos, dinámicos, de control, etc., así como nuevos conceptos y prototipos. Inicialmente, el esfuerzo de investigación realizado durante este trabajo ha estado centrado en la validación y puesta en marcha del principio básico de locomoción. En este aspecto, algunos autores han propuesto diferentes enfoques, donde el objetivo principal ha sido crear un sistema mecánico, el cual permitiera modificar la localización del CM de la esfera y, por lo tanto, inducirle movimiento. Crossley *et al.* (25) y, en especial, Armour *et al.* (26) presentan las diferentes alternativas de mecanismos de inducción de movimiento, también denominados Unidades Internas de Locomoción (UIL), las cuales son presentadas en esta sección junto con un resumen de sus ventajas y desventajas.

2.2.1. Cuerpo central con muelle

El primer concepto se puede denominar *cuerpo central con muelle* (en inglés se identifica como “*spring central member*”) y fue presentado originalmente por Halme *et al.* (27, 28). Esta alternativa presenta un sistema con cuerpo exterior de forma esférica, en el cual se aloja una UIL que consta de un cuerpo central rígido, el cual tiene en uno de sus extremos una rueda actuada, mientras que en el otro extremo posee una rueda pasiva (no actuada). Además, dicho cuerpo rígido cuenta con un muelle que le permite garantizar el contacto de ambas ruedas con el interior del cuerpo esférico (ver Figura 2.2).

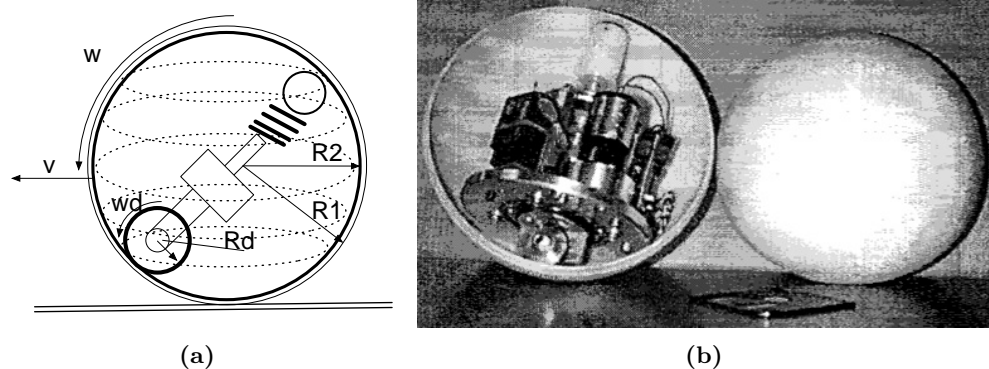


Figura 2.2: Alternativa de mecanismo interno denominada *cuerpo central con muelle*. En (a) se muestra el concepto del cuerpo rígido con muelle y ruedas actuadas y pasivas en sus extremos. En (b) se presenta el prototipo desarrollado por Halme *et al.* (27, 28)

2. ESFERAS ROBÓTICAS: ESTADO DEL ARTE

La rueda actuada cuenta con dos grados de libertad (GdL), el primero de rodamiento de ésta sobre la superficie interior del cuerpo esférico y el segundo que le permite cambiar la dirección a la rueda. Aunque el cambio de dirección en el desplazamiento del robot no es inmediato, se puede lograr directamente con el cambio del actuador que cambia de sentido u orientación la rueda actuada. Sin embargo, las desventajas de este sistema son varias. Por una parte, el mecanismo atraviesa de extremo a extremo el interior de la esfera, por lo cual no existe manera de concentrar la masa del robot en uno de los hemisferios de la esfera, dificultando el principio básico de funcionamiento, *i.e.*, desplazamiento del CM, esto a su vez reduce las prestaciones del vehículo en cuanto al tamaño de los obstáculos que puede superar, así como las pendientes que puede subir. Además, la principal desventaja de esta alternativa es la ineficiencia energética, ya que adicional a la fricción de la esfera sobre la superficie de desplazamiento, se tiene la fricción de las ruedas actuada y pasiva con la superficie interna de la esfera.

2.2.2. Coche interno de locomoción

Otra alternativa, denominada en este documento como *coche interno de locomoción* (en inglés se define como “*Car driven*”), fue presentada por primera vez por Bicchi *et al.* (29, 30). Esta variante, como su denominación ya lo deja implícito, cuenta con un vehículo con ruedas en el interior del cuerpo esférico que sirve como UIL (ver Figura 2.3a). Su principal ventaja es la simplicidad en la construcción, dado que todo lo referente al diseño mecánico y electrónico lo aporta el vehículo interior, que es sistema móvil típico y ampliamente desarrollado en la actualidad. Otra ventaja se da en la posición del CM, ya que la masa del cuerpo esférico es despreciable frente a la del vehículo interior, y dado que éste se desplaza sobre el interior de la esfera, el CM está lo más alejado posible del CG. Esta última característica favorece a la capacidad de sobrepasar obstáculos así como subir pendientes.

Sin embargo, este robot cuenta con desventajas que deben ser consideradas. Por una parte, el contacto de las ruedas del vehículo interior con la superficie interna de la esfera, representa una pérdida energética por fricción. Otra desventaja importante se da cuando el robot se desplaza en superficies irregulares con baches o sobresaltos, ya que la UIL (*i.e.*, el coche interior) no cuenta con ningún sistema que asegure su contacto continuo con el interior del cuerpo esférico (ver Figura 2.3b), lo que puede dificultar su control en esta clase de terrenos.

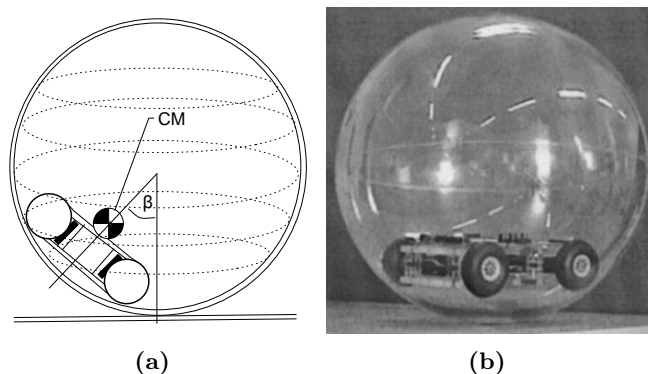


Figura 2.3: Alternativa de mecanismo interno denominada *coche interno de locomoción*. En (a) se muestra el concepto. En (b) se presenta el prototipo real desarrollado por Alves *et al.* (31)

2.2.3. Masa pendular con eje fijo

La configuración más común de mecanismos internos de esferas robóticas es la denominada *masa pendular con eje fijo* (en inglés se identifica como “*ballast mass with fixed axis*”). Este sistema está compuesto por un eje fijo al cuerpo esférico, el cual atraviesa de extremo a extremo y pasa por su CG. Dicho eje sirve como base de un sistema pendular de dos GdL, donde el primero de ellos gira alrededor del eje fijo (eje transversal) y el segundo en sentido perpendicular del primero (eje longitudinal). En el extremo del sistema pendular se tiene una masa que permite mover el CM fuera del CG de la esfera (ver Figura 2.4a).

Sobre esta alternativa mecánica se presentan diferentes desarrollos que han mostrado continuidad y aplicabilidad en diferentes tareas. En 2001, Michaud *et al.* (6, 9, 32, 33, 34, 35) presentan Roball, el primer prototipo de esta clase esferas robóticas (ver Figura 2.5a). Seeman *et al.* (3, 36) muestran las pruebas de teleoperación del robot GroundBot, primer prototipo de Rotundus[®], la primera esfera robótica comercial (ver Figura 2.5b)¹. Liu *et al.* (37, 38, 39) presentaron diferentes desarrollos en 2008 en temas de modelado y simulación de su prototipo BYQ-III (ver Figura 2.5c). Finalmente, Zhan *et al.* (40, 41, 42, 43), además de mostrar desarrollos teóricos y experimentales, uno de sus prototipos presenta un mecanismo alternativo de actuación sobre el primer GdL, en el cual, de manera similar que las esferas robóticas tipo *cuerpo central con muelle*,

¹<http://www.rotundus.se/>

2. ESFERAS ROBÓTICAS: ESTADO DEL ARTE

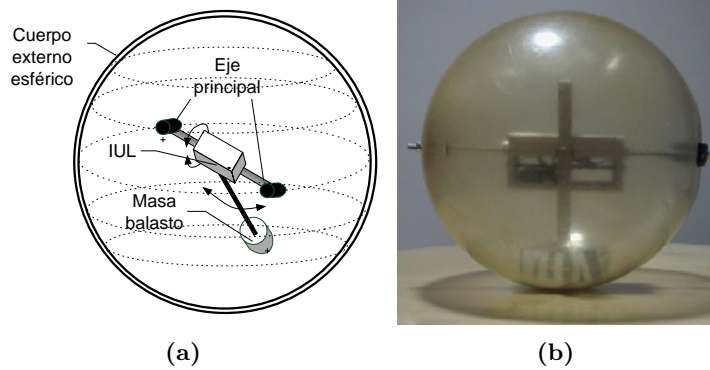


Figura 2.4: Alternativa de mecanismo interno denominada *masa pendular con eje fijo*. En (a) se muestra el concepto de un cuerpo esférico que tiene un eje que pasa por su centro geométrico y sobre el cual se ubica un sistema pendular. En (b) se presenta un prototipo desarrollado por Bruhn *et al.* (8) que cuenta con este tipo de mecanismo.

utiliza una rueda actuada con un GdL, la cual le permite mover el sistema pendular alrededor del eje principal (ver Figura 2.5d).

Las esferas robóticas de este tipo presentan diferentes ventajas. Por una parte, el sistema interior es de una complejidad media en cuanto a construcción, ya que consta de un mecanismo pendular, similar a otros de este tipo, con la diferencia que éste se sujeta a un eje que atraviesa el interior de la esfera, pasando por su CG, y se fija a los extremos de la esfera. Al ser un sistema mecánico de este tipo, se asegura que la masa se encuentra concentrada en el hemisferio inferior de la esfera, lo que aporta al principio básico de locomoción ya explicado. Dado que en esta configuración no se tienen ruedas en contacto con la superficie interna de la esfera, se minimizan las pérdidas energéticas a aquellas presentes por el contacto entre la esfera y la superficie, presente en todas las alternativas.

2.2.4. Masa pendular con eje móvil

Esta variante denominada *masa pendular con eje móvil* (en inglés se identifica como “*ballast mass with moving axis*”) cuenta con un sistema pendular interno, al igual que el mecanismo anterior, pero en este caso posee con un GdL adicional que permite al eje principal desplazarse. Rollo es el único robot encontrado en la revisión bibliográfica de este tipo, fue desarrollado por Ylikorpi *et al.* (23) bajo un proyecto iniciado en el

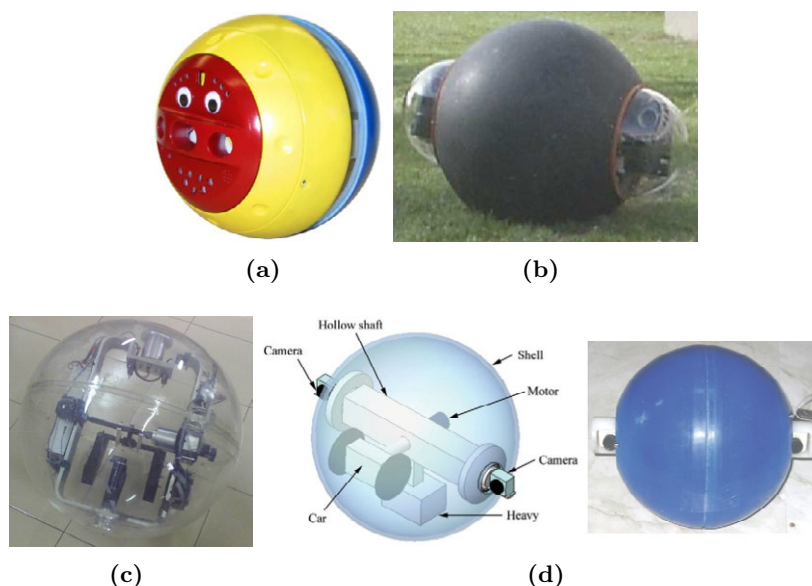


Figura 2.5: Algunas de las esferas robóticas de tipo *masa pendular con eje fijo* con mayor continuidad y aportes realizados en el estudio de estos sistemas. (a) Roball. (b) GroundBot. (c) BYQ-III. (d) BHQ-2

laboratorio de tecnología de automática, de la Universidad de Tecnología de Helsinki (HUT) (ver Figura 2.6) y se presenta como resultado del refinamiento de las esferas tipo *cuerpo central con muelle*.

Sin embargo, aunque las posibilidades de movimiento de este tipo de sistema se aumentan con el GdL adicional, acercando sus prestaciones a las de un vehículo holonómico, la adición de este GdL incrementa no solo las pérdidas energéticas por un actuador adicional, sino que además aumenta considerablemente la complejidad de construcción.

2.2.5. Masas móviles

La última alternativa de mecanismos internos de esferas robóticas se denomina *masas móviles* (en inglés se identifica como “*mobile masses*”). Ésta cuenta con diferentes ejes que van desde el CG hasta la superficie interior del cuerpo esférico del robot. Sobre estos ejes radiales se ubican y desplazan masas que permiten, por medio de su movimiento en conjunto, modificar la posición global del CM del robot. A diferencia de los mecanismos previamente mencionados, este tipo de robot tiene la capacidad de realizar

2. ESFERAS ROBÓTICAS: ESTADO DEL ARTE



Figura 2.6: Rollo, esfera robótica tipo *masa pendular con eje móvil*. Cuenta con un sistema pendular interno de dos GdL, pero su eje central no es fijo, sino que rota en sentido perpendicular.

movimientos omnidireccionales (ver Figura 2.7).

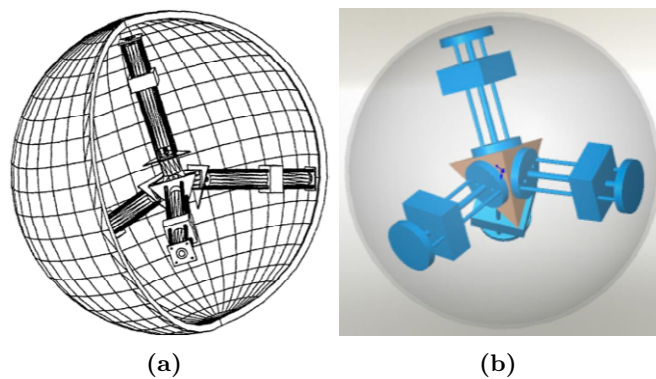


Figura 2.7: Alternativa de mecanismo interno *masas móviles*. En (a) se presenta August, prototipo de esta clasificación desarrollado por Javadi *et al.* (44). En (b) se presenta un concepto del cual Shengju *et al.* (45) proponen el modelo y simulación del sistema.

Las principales ventajas de este tipo de esferas robóticas son sus movimientos omnidireccionales, lo que lo convierte en un sistema holonómico, único entre las alternativas existentes. Además, dado el tipo de mecanismo (masas móviles en ejes radiales), las masas pueden llegar hasta el extremo del interior del cuerpo esférico, lo que incrementa sus prestaciones para superar obstáculos y subir pendientes. No obstante, su mayor dificultad se presenta en la complejidad de construcción, así como en la maniobrabilidad (controlabilidad) del mismo, dado que cualquier movimiento de alguna de las masas de los ejes radiales, implica efectos dinámicos sobre el sistema que pueden inducir a inestabilidad al mismo.

2.2.6. Comparación de alternativas de mecanismo interno

Las diferentes alternativas de mecanismos internos presentados en las secciones anteriores, pueden ser evaluadas y comparadas bajo diferentes parámetros y características, las cuales se presentan en la Tabla 2.1, la cual sintetiza la información presentada por Armour *et al.* (26) y Crossley *et al.* (25), junto con la experiencia propia adquirida durante el desarrollo de este proyecto. En dicha Tabla se puede apreciar que las alternativas *masa pendular con eje fijo y móvil*, así como con *masas móviles*, son aquellas que en general presentan mayores ventajas.

característica mecanismo	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
Cuerpo central	++	+	+	+	+	++
Coche interno	+	+++	+++	+++	+	+
Masa pendular con eje fijo	++	++	++	++	+++	+++
Masa pendular con eje móvil	+++	+	++	++	+++	+++
Masas móviles	+++	+	+++	+++	++	++

Tabla 2.1: Comparación de las diferentes alternativas del mecanismo interno de una esfera robótica de acuerdo a las siguientes características: C_1 =capacidad de sortear obstáculos, C_2 =Simplicidad constructiva, C_3 =Capacidad para superar pendientes, C_4 =Capacidad para superar obstáculos, C_5 =Eficiencia energética, C_6 =Maniobrabilidad

La primera característica C_1 hace referencia a la *capacidad de sortear obstáculos*, lo que está relacionado directamente con la posibilidad de realizar cambios de dirección rápidos durante los desplazamientos, así como con la holonomicidad del robot. La característica C_2 hace referencia a la *simplicidad constructiva* y está determinada por la complejidad del mecanismo interno. C_3 habla sobre la *capacidad para superar pendientes*, lo cual se puede lograr concentrando la masa lo más distante del centro geométrico (CG) del robot, es decir, alejando en lo posible el CM del CG, lo que también determina en gran medida la característica C_4 , que habla sobre *capacidad para superar obstáculos*. Por otra parte, la característica o parámetro C_5 habla sobre la *eficiencia energética*, que es evaluada por el número de actuadores involucrados en el mecanismo interno o en los casos donde éste mantiene algún tipo de contacto con el interior del cuerpo esférico. Por último, se tiene C_6 que es referente a la *maniobrabilidad*, la cual depende de la controlabilidad del mecanismo interno y, consecuentemente, del robot.

2. ESFERAS ROBÓTICAS: ESTADO DEL ARTE

A pesar de que las 3 alternativas más destacadas son *masa pendular con eje fijo y móvil* y *masas móviles*, para el desarrollo de este proyecto se ha seleccionado un sistema de *masa pendular con eje fijo*. Este tipo de sistema, respecto a los otros 2, es más sencillo en cuanto a construcción se refiere. Además, los extremos del eje fijo aportan puntos donde se pueden alojar diferentes sensores, incluyendo cámaras, los cuales pueden ser direccionados y se encuentran en zonas donde la esfera normalmente no se apoya mientras realiza su desplazamiento, excepto que en los casos donde ocurra una colisión (Ver Figuras 2.5b, 2.5d).

2.3. Aportaciones en modelado, simulación y control

Como se ha mencionado al inicio de este capítulo, se pueden encontrar diferentes referencias bibliográficas que se abordan los problemas de modelado, simulación y control de esferas robóticas. Entre éstas se pueden encontrar diferentes formulaciones, las cuales dependen del mecanismo interno del robot. En esta sección se mencionan las aportaciones más significativas, sin embargo, no se entra en detalle sobre alguna en particular, ya que un análisis específico del modelado del robot desarrollado en este proyecto se realiza en el Capítulo 4.

2.3.1. Cinemática y dinámica

La primera aportación sobre el modelado dinámico de esferas robóticas, fue presentado por Koshiyama *et al.* (46), quienes han desarrollado un sistema robótico que cuenta con una rueda de forma esférica, que en su interior contiene un mecanismo de control de movimiento. El robot cuenta con la capacidad de realizar movimientos omnidireccionales y se presentan los resultados del mismo realizando trayectorias simples (rectas) sobre superficies regulares, planas y con inclinación. Los autores desarrollan el modelo dinámico del robot mediante la formulación de las ecuaciones de Lagrange y separan, por simplicidad, la dinámica de marcha y la dinámica de giro del robot. Estas ecuaciones han sido modificadas y adaptadas para el caso particular de una esfera robótica de tipo *masa pendular con eje fijo* por Nagai (21).

La separación en el análisis dinámico ha sido estudiado y argumentado en detalle por algunos autores, como lo ha presentado Kayacan *et al.* (47), y es utilizado en

2.3 Aportaciones en modelado, simulación y control

muchas de las aportaciones existentes. Esta suposición implica simplificaciones considerables en el modelo final. Por una parte, permite estudiar el movimiento inducido por el desplazamiento del CM como principio básico para inducir movimientos hacia delante y atrás. Por otra parte, permite entender el efecto del desplazamiento del CM en un plano perpendicular al del desplazamiento y el efecto que esto trae en la generación de movimientos curvos. Sin embargo, aunque los análisis se realicen por separado, la velocidad angular de la esfera obtenida del análisis la dinámica de marcha, es considerada en la dinámica de giro.

Una de las contribuciones más destacadas y referenciadas, base de muchos de los desarrollos actuales, es la desarrollada por Halme *et al.* (27). En ésta se presenta el análisis dinámico de un robot tipo *cuerpo central con muelle* (ver Figura 2.2), donde se desarrollan las ecuaciones necesarias para describir movimientos rectos utilizando la formulación de Newton. Algunas consideraciones adicionales que se abordan en este trabajo, incluyen desplazamientos sobre superficies con pendientes, así como restricciones para superar obstáculos. No obstante, Halme *et al.* no incluyen el análisis de la dinámica de giro, lo cual representa una limitación importante en el modelo. Parte del estudio preliminar realizado en este proyecto ha comparado los resultados del modelo de la dinámica de marcha propuesto mediante la formulación de Lagrange, previamente mencionado, así como el descrito en este momento, obteniendo como resultado dos modelos equivalentes en comportamiento dinámico con diferentes formulaciones.

Por otra parte, Bicchi *et al.* (29, 30) presentan un análisis detallado de la cinemática y la dinámica de una esfera robótica tipo *coche interno de locomoción* (ver Figura 2.3). Además de hacer uso de la formulación Lagrangiana, realizan su estudio considerándolo como un sistema no-holonómico y las restricciones cinemáticas y dinámicas que esto implica. No obstante, las aportaciones mencionadas no desarrollan las restricciones bajo las cuales el vehículo interno se desplaza, ya que éste no se mueve en una superficie plana, sino en el interior de un cuerpo esférico, lo que limita sus posibilidades de movimiento.

En el caso de los robots tipo *masas móviles* (ver Figura 2.7), Javadi *et al.* (44) presentan un robot omnidireccional con cuatro eje axiales, cada uno de ellos con una masa móvil. Las ecuaciones de movimiento son desarrolladas utilizando la formulación Newtoniana, donde el análisis incluye dos conjuntos de cuerpos; el primero de cuerpos dinámicos, que incluye los ejes axiales y sus masas móviles, y el segundo de cuerpos

2. ESFERAS ROBÓTICAS: ESTADO DEL ARTE

estáticos, que incluye el cuerpo esférico exterior y los motores. Al ser un robot omnidireccional y por el tipo de movimiento que puede realizar, no es necesario separar la dinámica de marcha y giro, por lo que se presenta un análisis general de movimientos inducidos por variación del CM. Un modelo similar para un sistema de este tipo ha sido presentado por Shengju *et al.* (45). A pesar de que Javadi *et al.* mencionan el desarrollo de un prototipo real, del cual no se encuentran imágenes, y que Shengju *et al.* muestran resultados de simulación similares, en ambos casos se menciona la dificultad de controlar el sistema, dado el efecto que el movimiento de las demás masas implica sobre la estabilidad del robot. Además, adicional a estas referencias, no se encuentran aportaciones adicionales o continuidad en estos proyectos.

Por otra parte, como se ha mencionado previamente, los robots tipo *masa pendular con eje fijo* son los que centran el interés de los investigadores y, en consecuencia, son los que mayor registro de prototipos y aplicaciones tienen. Se pueden encontrar modelos dinámicos que van desde la formulación general de Lagrange, como lo hace Laplante *et al.* (35); pasando por otros modelos como el presentado por Liu *et al.* (38, 39), que utilizan la formulación Euler-Lagrange; hasta encontrar modelos más elaborados y con más consideraciones como el utilizado por Zhan *et al.* (40, 41, 42, 43), quienes resuelven la dinámica del sistema mediante la ecuación de Boltzmann-Hamel, la cual se obtiene de la simplificación del principio D'Alembert-Lagrange. No obstante, y a pesar de las variantes, todas las formulaciones parte del un punto común, la formulación de ecuaciones de Lagrange. Otra contribución importante que se ha hecho para el análisis de este tipo de sistemas, es la validación del modelo desacoplado de la dinámica de marcha y la de giro, presentado por Kayacan *et al.* (47), lo que simplifica notablemente el estudio de este tipo de sistemas.

2.3.2. Control y planificación de trayectorias

En la revisión bibliográfica realizada, se pueden destacar algunas contribuciones referentes al control y planificación de trayectorias de este tipo de sistemas, específicamente para los tipos *coche interno de locomoción* y de *masa pendular con eje fijo*. No obstante, algunas referencias hacen aportaciones generales, las cuales pueden ser aplicadas a las diferentes alternativas mecánicas mencionadas en este capítulo. Por ejemplo, Mukherjee *et al.* (48, 49) proponen el estudio de la planificación de trayectorias y control de las esferas robóticas, definiendo todos los movimientos mediante la combinación

de rectas y segmentos de arco circulares, los cuales pueden basarse en las estrategias de un problema ampliamente estudiado como es el sistema bola-placa (“*ball-plate*”). Otra referencia de carácter general es la presentada por Svinin *et al.* (50), donde se analiza el caso de la planificación de movimientos de una esfera que rueda sobre una superficie, pero la superficie de rodadura de la esfera está restringida o acotada, lo cual es coherente y aplicable para el caso de *masa pendular con eje fijo*.

Por otra parte, un análisis particular de la planificación de trayectorias y control robots tipo *coche interior de locomoción* se presenta por Alves *et al.* (31), donde se considera el coche interior como una masa móvil que se mueve dentro de un cuerpo esférico. Se asume que dicho coche concentra la totalidad de masa del sistema (se desprecia la masa de la esfera).

Sobre los robots *masa pendular con eje fijo*, Liu *et al.* han evaluado diferentes alternativas para controlar el sistema, como el uso de técnicas lineales basadas en modelos simplificados (37), así como técnicas de control no lineal, específicamente modos deslizantes (38). Otro enfoque aplicable a este tipo robot es el expuesto por Kayacan *et al.* (47), donde el desacople de la dinámica de marcha y la de giro, permiten dividir el problema y el control del sistema por medio de controladores independientes que utilizan la linealización del estado realimentado.

Por último, y nuevamente aplicado al mismo tipo de robot, Zhan *et al.*, quienes han presentado el mayor desarrollo en cuanto a modelado se refiere (mencionado en la sección anterior), han desarrollado métodos de planificación de movimientos que incluyen un estudio en detalle de la dinámica de marcha y giro, que le permiten describir de manera completa movimientos rectos y circulares, lo cuales son combinados para realizar trayectorias más complejas (40). Además han presentado el análisis obtener trayectorias óptimas respecto al tiempo y la energía (42). Entre los métodos de control desarrollados se encuentran técnicas como “*back-stepping*” (41).

2.4. Aplicaciones

Algunas investigaciones son realizadas por el interés académico e investigativo que sus estudios y desarrollos implican. No obstante, y más aún en el campo de la ingeniería, el propósito de una investigación debería tener un matiz práctico que le de utilidad y aplicabilidad que permitan justificar su financiamiento para futuros desarrollos. En esta

2. ESFERAS ROBÓTICAS: ESTADO DEL ARTE

sección se presentan algunos contextos en los cuales se ha propuesto el uso de esferas robóticas, en algunos casos se han definido solamente conceptos, mientras que en otros se cuenta con prototipos reales.

Una de las características más importantes de este tipo de robots es su forma regular esférica. Debido a esta, el robot tiene la capacidad de recuperarse fácilmente de colisiones, ya que sin importar la dirección del impacto que sufra, el robot siempre entrará en una configuración recuperable. Además, las esferas robóticas pueden desplazarse en diferentes superficies, esto se debe principalmente por el tipo alternativo de tracción, ya que no se tiene una rueda que sostiene un peso y gira respecto a éste, como ocurre en un coche, o robot con ruedas, sino que el robot completo es la rueda misma (*i.e.*, la esfera) y funciona por un desbalance que desestabiliza el sistema y le induce movimiento. Esto facilita que las esferas robóticas se puedan utilizar en diferentes superficies. Esta característica, junto con otras ya mencionadas, amplían el campo de sus posibles aplicaciones.

Los autores de algunos de los prototipos mencionados han aplicado estos sistemas robóticos en diferentes áreas. Tal vez la más citada y ambiciosa de éstas, es la que propone su uso para la exploración de ambientes no estructurados y desconocidos, como sería el caso de la exploración planetaria. Sobre este campo de aplicación, Michaud *et al.* (6) y Bruhn *et al.* (8) han estudiado los requisitos necesarios y han evaluado la idoneidad del uso de esferas robóticas. En la actualidad se envían vehículos robóticos en aeronaves espaciales, para los cuales un requisito crítico es el correcto despliegue de éstos sobre la superficie a explorar, ya que en caso de no lograr quedar en una configuración adecuada para iniciar la tarea de exploración, las pérdidas económicas son considerables. En el caso de las esferas robóticas, su forma regular y capacidad de recuperación de colisiones, plantea la posibilidad de tener un sistema de fácil despliegue. Otra característica es la capacidad de desplazarse en diferentes superficies, incluyendo terrenos no compactados (*e.g.*, arena), como la que se puede presentar en estos entornos.

Otra posible área de aplicación es la exploración e inspección en tareas de vigilancia y seguridad. Para esto, se han hecho aportaciones en el mejoramiento de interfaces de teleoperación y en la maniobrabilidad del sistema, como lo ha presentado Seeman *et al.* (3, 36). En este caso, el robot es equipado con diferentes sensores, entre éstos cámaras que facilitan al operador maniobrar remotamente el robot. Dada la forma del robot y

mecanismo de desplazamiento, todos los elementos sensoriales y de procesamiento para la teleoperación o navegación autónoma

Finalmente, las esferas robóticas han sido probadas en diferentes ambientes, para la validación de uno de los requisitos principales de los robots de servicio, esto es la capacidad de interacción segura con las personas. La aplicación más sobresaliente en este aspecto es la presentada Michaud *et al.* (9), donde una esfera robótica ha sido equipada con las rutinas de comportamiento y control, así como los sensores necesarios, que le permite evaluar y mejorar el desarrollo de los niños con una edad entre los 12 y los 24 meses (ver Figura 2.5a).

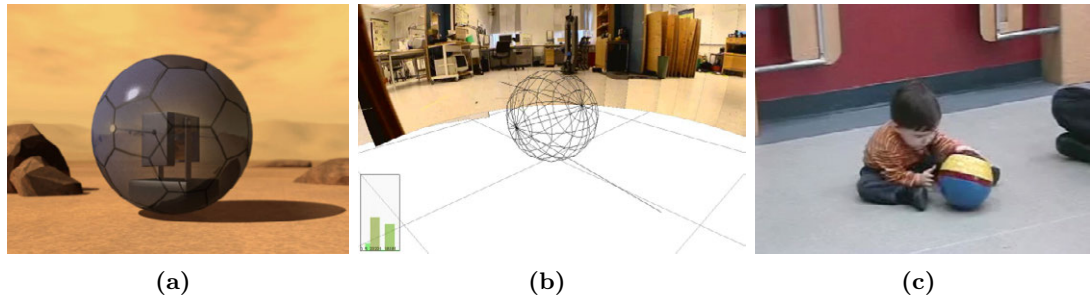


Figura 2.8: Conceptos y prototipos reales de aplicaciones de esferas robóticas. En (a) se muestra un concepto presentado por Bruhn *et al.*(8), en el cual se propone el uso de una esfera robótica para exploración planetaria. En (b) se presenta el campo de visión de las cámaras de GroundBot, una esfera robótica que es teleoperada y es utilizada para tareas de exploración y vigilancia (36). En (c) se presenta una esfera robótica desarrollada por Michaud *et al.* (9, 33) la cual es utilizada para medir y mejorar el desarrollo de los niños entre los 12 y los 24 meses.

2. ESFERAS ROBÓTICAS: ESTADO DEL ARTE

3

ROSPHERE: diseño mecánico y prototipos

Como se ha mencionado en el capítulo 1, el interés inicial sobre las esferas robóticas aparece de la necesidad de desarrollar un sistema robótico móvil, que sea capaz de realizar tareas de exploración y registro de variables físicas sobre materiales de baja compactación. De esta primera motivación, se han definido diferentes requisitos y especificaciones del sistema, los cuales han permitido la evaluación del mismo en diversas aplicaciones. La primera parte de este capítulo se centra en la evaluación de los criterios usados para la selección de la alternativa mecánica, para luego entrar en detalle en los aspectos mecánicos del robot. Finalmente, a lo largo del capítulo se mencionarán algunos de los planos del diseño de las partes del robot, los cuales pueden ser observados en el Anexo D.

3.1. Configuración mecánica seleccionada

En las aplicaciones donde se ha planteado y evaluado el desarrollo de este proyecto, aparece como una constante la necesidad de tener elementos que faciliten la toma de diferentes tipos de medidas. El análisis de éste y otros requisitos del sistema se ha realizado junto con el estudio de las alternativas mecánicas existentes de esferas robóticas, las cuales han sido presentadas y analizadas en el capítulo 2.

En una primera aplicación planteada para la toma de mediciones en materiales no compactados, es clara la necesidad de tener elementos que puedan introducirse en dichos

3. ROSPHERE: DISEÑO MECÁNICO Y PROTOTIPOS

materiales para realizar las mediciones *in situ*. Por lo tanto, dichos elementos deberían estar dispuestos de manera tal que su orientación sea perpendicular con la superficie. En otros casos, como la toma de medidas físicas ambientales (*e.g.*, temperatura, humedad, luminosidad, etc.), es importante que los sensores sean externos al robot, de manera que las mediciones no se vean perturbadas por condiciones internas, como lo son el calentamiento por los motores, aislamiento térmico y lumínico por el cuerpo esférico del robot, etc.

Finalmente, en el caso de las tareas de exploración e inspección es necesario la utilización de cámaras que permitan realizar el reconocimiento de los espacios a recorrer; las cámaras, al igual que otros sensores, deberán estar ubicadas en el exterior de la esfera. Además, se debe procurar que las cámaras conserven una orientación en el sentido de movimiento del robot, tratando de minimizar el efecto de rotación continuo del robot en la captura de imágenes. Algunos de estos casos se pueden apreciar en los conceptos y prototipos presentados en la Figura 3.1.

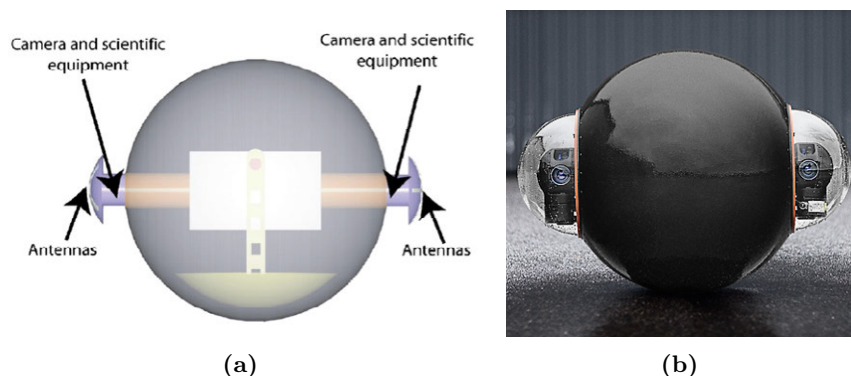


Figura 3.1: Esferas robóticas equipadas con diferentes equipos de instrumentación que incluyen cámaras, elementos de comunicación, medición, etc. En (a) se muestra un concepto presentado por Bruhn *et al.* (8), en el cual se propone el uso de una esfera robótica para tareas de exploración planetaria. En (b) se presenta GrounBot™, una esfera robótica equipada con cámaras, la cual es utilizada para inspección y exploración mediante la teleoperación del robot.

Considerando los requerimientos mencionados, se ha seleccionado como alternativa de mecanismo interno aquella denominada *masa pendular con eje fijo*, la cual fue presentada y analizada previamente en la sección 2.2.3 (ver Figura 2.4). Esta alternativa proporciona puntos fijos (extremos del eje principal), sobre los cuales se pueden ubicar

diferentes sensores externos. Además, estas zonas no se suponen como puntos normales de contacto de la esfera durante su desplazamiento, excepto que ésta esté bajo el efecto de una colisión. Otras alternativas que incluyen ruedas activas en su interior, como los son *cuerpo central con muelle y coche interno de locomoción*, fueron descartadas principalmente por su ineficiencia energética, como ya fue discutido en la sección 2.2.6. Las siguientes secciones de este capítulo se centran en el diseño y construcción de ROSPHERE (*“RObotic SPHERE”*), una esfera robótica de tipo *masa pendular con eje fijo*.

3.2. Concepto mecánico general

ROSPHERE cuenta con un sistema pendular interno de dos grados de libertad, como el que se puede apreciar en el concepto presentado en la Figura 3.2. Sus partes principales son: *a)* un cuerpo esférico externo, *b)* un eje principal fijo al cuerpo esférico, *c)* una unidad interna de locomoción (UIL), también definida por otros autores como unidad interna de control, y finalmente *d)* el pendular o masa colgante. Como se aprecia en la figura, el primer grado de libertad (GdL) permite la rotación de la UIL (y consecuentemente de la masa colgante) alrededor del eje fijo (eje transversal), con una rotación continua de 360° . Por otra parte, el segundo GdL permite la rotación de la masa colgante alrededor de un eje longitudinal el cual es perpendicular al primero, y tiene un rango rotación limitado, el cual podría ser idealmente de 180° , sin embargo, en la práctica se ve mecánicamente reducido.

Con base al concepto presentado en la Figura 3.2, una primera etapa ha incluido el diseño general del mecanismo interior, el cual relaciona las diferentes partes mencionadas (*i.e.*, cuerpo esférico, eje principal, UIL y masa pendular) y su forma de ensamblarse entre sí; esto se puede apreciar en la Figura 3.3. En ésta se presenta el diseño general 3D de un mecanismo interno que cumple con las especificaciones de sistemas de este tipo.

El mecanismo presentado en la Figura 3.3 fue diseñado utilizando Inventor®. En este diseño se presenta un eje de forma cilíndrica, el cual cuenta en sus extremos con soportes, los cuales son utilizados para fijar el eje al cuerpo esférico. En el centro del eje cilíndrico se ubica una pieza con forma de caja (prisma rectangular), la cual tiene la capacidad de girar libremente alrededor del eje. Sobre esta pieza se ubica un motor,

3. ROSPHERE: DISEÑO MECÁNICO Y PROTOTIPOS

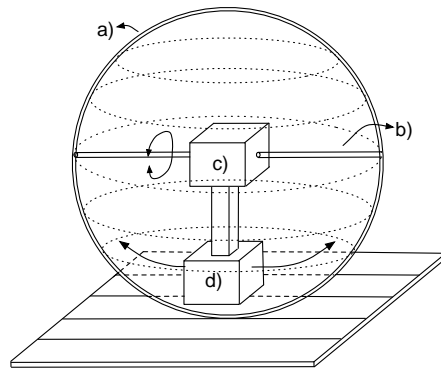


Figura 3.2: Concepto general de ROSPHERE. Donde *a)* es un cuerpo esférico externo, *b)* un eje principal fijo al cuerpo esférico, *c)* una unidad interna de locomoción y *d)* el pendular o masa colgante.

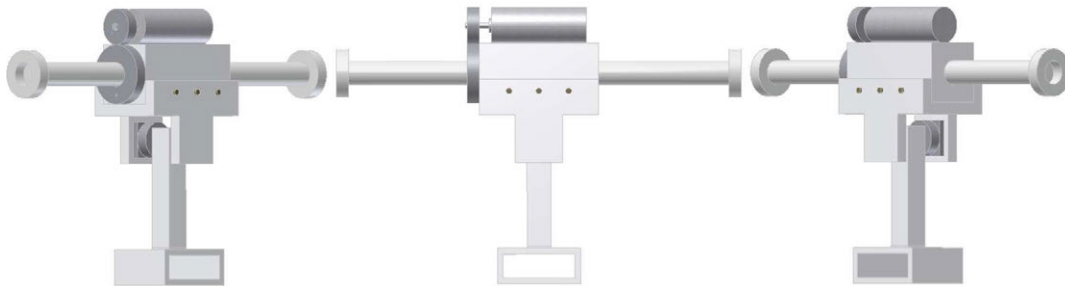


Figura 3.3: ROSPHERE v0.0. Diseño 3D inicial del mecanismo interno de la esfera robótica.

el cual tiene en su eje un engranaje que encaja con otro engranaje, el cual está fijado al eje cilíndrico. Ya que la caja central gira libremente sobre el eje principal, el giro que realiza el motor, considerando el ensamble con engranajes al eje principal (fijo a la esfera), implicará un giro de la caja central alrededor del eje principal, *i.e.*, el giro alrededor del eje transversal.

Fijada a la caja central, se tiene una pieza que soporta el segundo motor del mecanismo. Esta segunda pieza tiene un eje adicional (longitudinal), sobre el cual gira la masa-pendular según lo determina el segundo actuador. El sistema masa-pendular cuenta con un eje y una caja. En la caja se utiliza para alojar pesos adicionales, con el fin de desplazar el CM fuera del CG; en consecuencia, el eje del sistema masa-pendular pretende alejar la mayor distancia posible el CM del CG, esto resulta útil en el momento de definir los ángulos necesarios para inducir movimiento en sistema, aspecto que se analiza en detalle en el capítulo 4.

3.3. Diseño y construcción de prototipos reales

Se han desarrollado dos versiones de prototipos de ROSPHERE, una de ellas, como ya se ha mencionado, es resultado del refinamiento de la primera. Las dos están bajo la misma clasificación de esferas robóticas y están basadas en el diseño inicial presentado en la Figura 3.3. Algunos aspectos del diseño son constantes en los dos prototipos, por ejemplo para el cuerpo esférico se utiliza una bola de juego para hurones (ver Figura 3.4), ya que éstas cuentan con tapas donde se puede fijar el eje central del robot. Otro aspecto que se conserva en los diferentes prototipos es el eje central, el cual es un tubo de aluminio con diámetro de 12mm. De igual manera, los dos prototipos utilizan los mismos actuadores, servomotores HS-7954SH¹, uno de ellos modificado para funcionar en giro continuo. Finalmente, la mayoría de piezas internas adicionales que han sido diseñadas, han sido impresas en plástico ABS. Esos y otros detalles de diseño y construcción de los prototipos del robot, son presentados en esta sección.

3.3.1. Versión 0.1

Un primer prototipo, ROSPHERE v0.1, fue diseñado y construido para evaluar las capacidades de movimiento. Éste utiliza como cuerpo esférico una bola de color amarillo.

¹<http://www.hitecrd.com/products/digital/hv-ultra-premium-digital/not-set.html>

3. ROSPHERE: DISEÑO MECÁNICO Y PROTOTIPOS



Figura 3.4: Esfera de plástico de 32cm utilizada en ROSPHERE.

El robot, y en general los diferentes prototipos de ROSPHERE, puede considerarse como un sistema con 3 cuerpos rígidos y 2 articulaciones. Esta consideración es analizada en detalle en el capítulo 4. En esta sección se detallan el conjunto de piezas, de las cuales algunas fueron diseñadas utilizando Inventor[®] e impresas en plástico, y que conforman cada uno de dichos cuerpos rígidos. También se analiza en esta sección la disposición de los actuadores y la forma como conectan los cuerpos entre sí.

3.3.1.1. Cuerpo esférico y base flotante del robot

En una primera etapa de construcción, se ha fijado el eje de aluminio al cuerpo esférico (ver Figura 3.5d). Para esto, se han construido piezas utilizando plástico ABS (ver Figura 3.5a y Plano D.2), las cuales son fijadas a las tapas de la esfera y a las cuales se asegura el eje de aluminio (ver Figuras 3.5b y 3.5c). De esta manera se puede asegurar que el eje principal de aluminio es solidario en movimiento al cuerpo esférico, es decir, que el conjunto puede ser considerado como un único cuerpo rígido, que a diferencia de la base de un robot manipulador, que generalmente está fija e inmóvil, en este caso es flotante con la restricción propia en movimiento que determina la superficie de desplazamiento. Esa característica es relevante para el modelado y simulación del sistema, como se presentará en el Capítulo 4.

3.3.1.2. Cuerpo central

Si se considerara el mecanismo interno de ROSPHERE como una cadena abierta de cuerpos rígidos, éste podría ser analizado como un robot de tres cuerpos y dos GdL. El eje cilíndrico y de aluminio podría ser considerado como una base fija del robot,

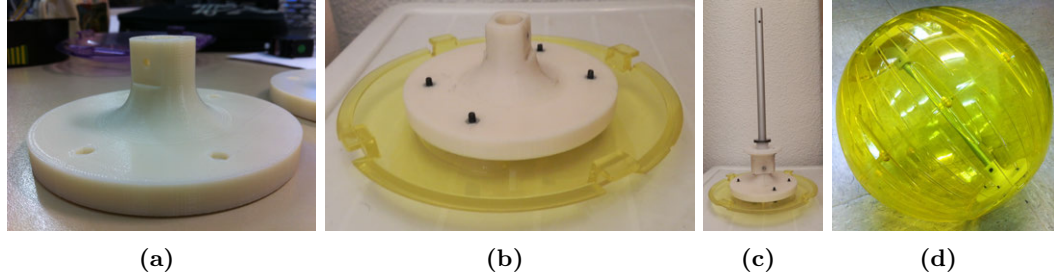


Figura 3.5: ROSPHERE v0.1: eje principal fijado a la esfera. En (a) se muestra la pieza de plástico diseñada e impresa, la cual es utilizada para sujetar el eje de aluminio a las tapas de la esfera (Plano D.2). En (b) se presenta la pieza de plástica sujeta a la tapa de esfera mediante tornillos. En (c) se puede apreciar el ensamble entre el eje de aluminio y la tapa de la esfera mediante el uso de la pieza de plástico. Finalmente, en (d) se presenta el eje fijo al cuerpo esférico.

mientras que los dos cuerpos serían móviles según los movimientos impuestos por los dos GdL. El primer cuerpo móvil de este mecanismo sería el que se presenta en esta sección.

Este primer cuerpo móvil del mecanismo está compuesto por dos piezas de plástico (ver Figuras 3.6a y 3.6b, Planos D.3 y D.4), que unidas giran alrededor del eje de aluminio y sobre una de las ellas se ubica la electrónica del robot, incluyendo sus procesadores, así como los sensores propioceptivos del robot (información que se ampliará en el Capítulo 5). Además, este cuerpo central incluye otras piezas adicionales sobre las cuales se fijan los actuadores de los dos GdL (ver Figura 3.6c y Planos D.3, D.4, D.5 y D.6).

3.3.1.3. Cuerpo masa-pendular

Continuando con el análisis presentado en la sección anterior, de un mecanismo de tres cuerpos rígidos y dos GdL, esta sección presenta el tercer cuerpo, segundo cuerpo móvil, el cual gira alrededor de un eje perpendicular al del primer GdL. Este cuerpo está compuesto por una pieza, que sirve para alejar la masa pendular lo más posible del eje de la esfera, modificando así su Centro de Masa y de una segunda pieza, diseñada para alojar en su interior la masa pendular. En la Figura 3.7 (Planos D.7 y D.8) se presenta el diseño CAD del sistema masa-pendular, así como el acople con el cuerpo central.

3. ROSPHERE: DISEÑO MECÁNICO Y PROTOTIPOS

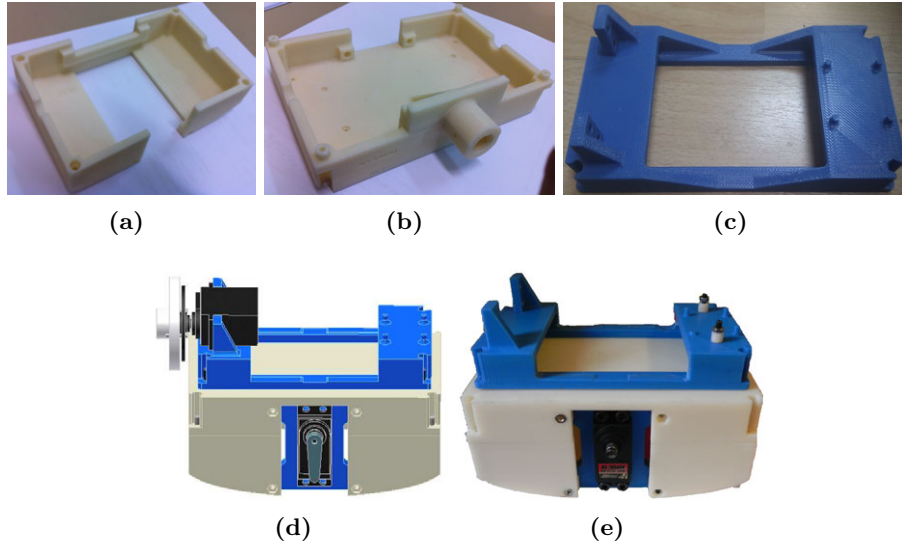
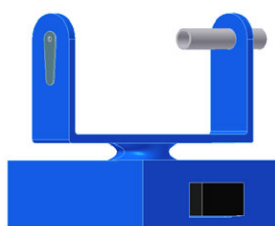
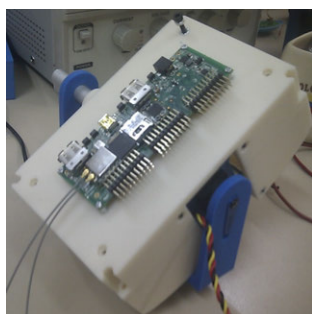


Figura 3.6: ROSPHERE v0.1: cuerpo central del robot, el cual gira alrededor del eje de aluminio. Está compuesto por diferentes piezas, de las que se pueden destacar (a) (Plano D.3) y (b) (Plano D.4), las cuales forman el cuerpo principal, al cual se fijan otras piezas donde se ubican los motores, como la presentada en (c) (Plano D.6). El diseño CAD y versión real de este cuerpo se observa en (d) y (e), respectivamente.

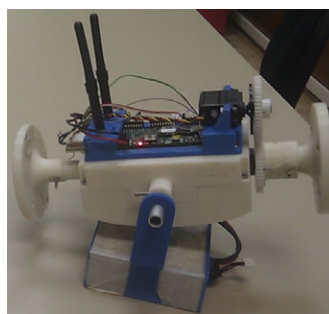
El primer prototipo (v0.1) del robot ha permitido validar el funcionamiento del sistema electromecánico del robot, así como realizar unas primeras valoraciones sobre las capacidades de movimiento de la esfera robótica. El sistema de cuerpos rígidos, compuesto por un cuerpo exterior de forma esférica y un sistema pendular interno, se ha ensamblado como se presenta en las Figuras 3.8b y 3.8c. El análisis de su funcionamiento ha permitido realizar ciertas mejoras, llevadas a la práctica en la segunda versión (v0.2) y son explicadas en la siguiente sección.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7: ROSPHERE v0.1: Cuerpo de masa colgante. En (a) se presenta el diseño CAD de las diferentes piezas ensambladas que conforman este cuerpo. En (b) se presenta el cuerpo de masa-pendular ensamblado por medio de un actuador al cuerpo central. En (c) se observa el mecanismo interno completo y ensamblado durante unas pruebas para verificar del movimiento de los dos GdL.

3. ROSPHERE: DISEÑO MECÁNICO Y PROTOTIPOS

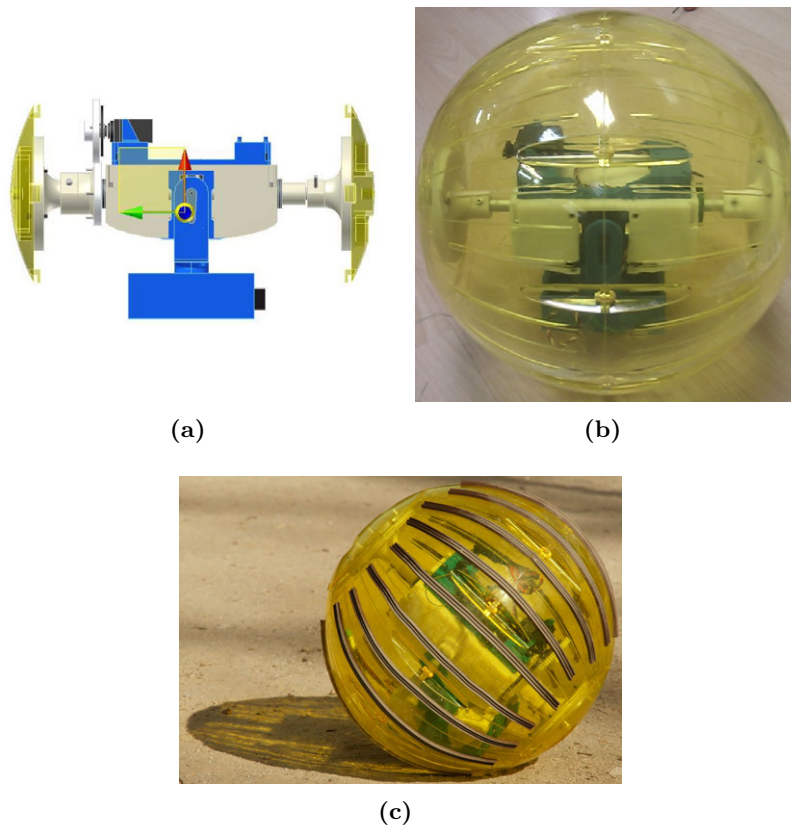


Figura 3.8: ROSPHERE v0.1. En (a) se presenta el diseño CAD completo del mecanismo interno del robot, incluyendo las tapas del cuerpo esférico. En (b) y (c) se presenta el robot completamente ensamblado, específicamente en la segunda se muestra en una prueba en entornos exteriores, se puede apreciar que al cuerpo esférico se le han añadido bandas que tienen como propósito reducir el deslizamiento en superficies lisas, así como disminuir el desgaste del cuerpo esférico por efectos de fricción.

3.3.2. Versión 0.2

Después de analizar y evaluar los resultados obtenidos con el primer prototipo (v0.1), algunas deficiencias de diseño han sido detectadas, las cuales producen inestabilidad en el robot, que implica la necesidad de adicionar una cantidad considerable de masa en el sistema pendular. Como se explica en detalle en el Capítulo 4, otro factor importante es el ángulo requerido para inducir movimiento en el sistema. Este ángulo depende de diferentes factores, entre éstos, y relativo a la mecánica, se puede destacar la posición relativa del CM respecto al CG. En otras palabras, cuanto mayor sea la distancia del CM respecto al CG de la esfera, menor es el ángulo requerido para inducir movimiento en el robot.

Considerando esto, un segundo prototipo, ROSPHERE v0.2, ha sido diseñado con el objetivo de alejar el CM del CG de la esfera. La versión v0.1 ha sido usado para validar las prestaciones del robot, por lo que muchas de las piezas fueron sobredimensionadas en tamaño, y por lo tanto en material. Esto hace que el cuerpo central, explicado en la Sección 3.3.1.2 y compuesto por las piezas mostradas en las Figuras 3.6a, 3.6b y 3.6c, concentre una cantidad importante de la masa total del sistema. Para mejorar este aspecto, la versión v0.2 presenta un nuevo cuerpo central central compuesto por una única pieza (ver Plano D.11).

Otro de los aspectos mecánicos que se han mejorado en la versión v0.2, ha sido el nuevo diseño de las piezas que conforman el sistema de masa-pendular. Lo que antes había sido diseñado con forma de caja para alojar la batería y masas adicionales (ver Figura 3.7), ha sido rediseñado con forma de casquete esférico, con el objetivo de ubicar la batería y masas adicionales lo más cercano posible al extremo interior de la esfera.

Para este prototipo se ha verificado este criterio de diseño (*i.e.*, posición del CM) utilizando Inventor[®]. Esto ha permitido verificar el nuevo diseño previo a su impresión. Las pruebas han demostrado mayor estabilidad, así como la necesidad de un menor ángulo en el péndulo para inducir movimiento, respecto a la versión v0.1. El nuevo mecanismo se puede apreciar en la Figura 3.9.

3. ROSPHERE: DISEÑO MECÁNICO Y PROTOTIPOS

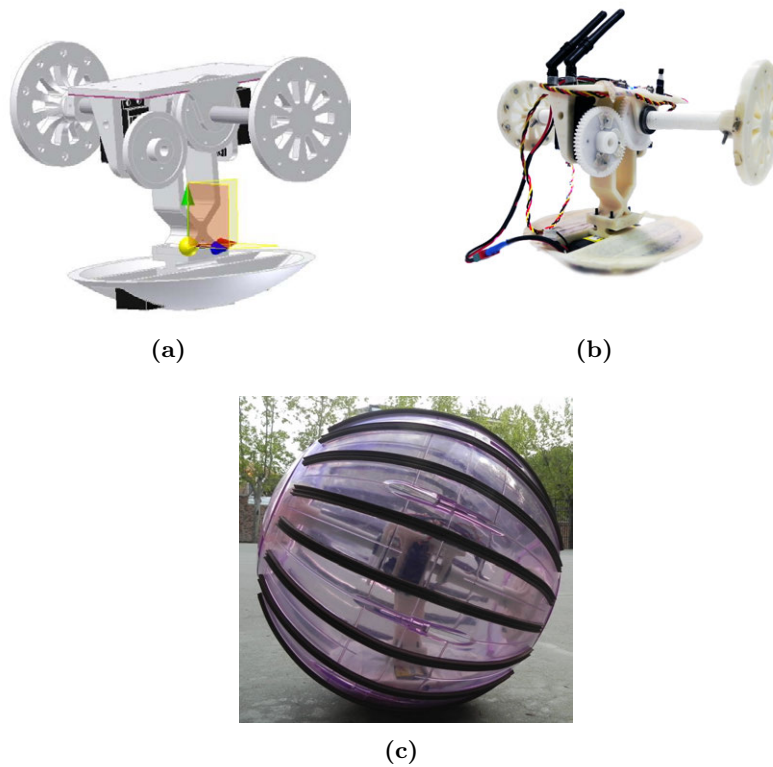


Figura 3.9: ROSPHERE v0.2. En 3.9a se presenta el diseño CAD completo del mecanismo interno del robot, en el cual se pueden apreciar piezas con mayor cantidad de espacios libres de plástico, así como piezas de menor volumen. En (c) se aprecia el mecanismo interno real, incluyendo las conexiones eléctricas, procesadores y batería. En (c) se presenta la versión completa del robot v0.2.

4

ROSPHERE: modelado y simulación

Como se ha mencionado en el Capítulo 2, algunas contribuciones previas de diferentes autores se han enfocado en desarrollar modelos matemáticos y físicos de esferas robóticas. Estos modelos son importantes ya que permiten simular el comportamiento dinámico del robot, lo que a su vez facilita la definición de diferentes aspectos y criterios de diseño, así como las especificaciones del mismo. Considerando lo expuesto en el Capítulo 3, donde se ha presentado la alternativa mecánica seleccionada, *i.e.*, una esfera robótica de tipo *masa pendular con eje fijo*, este capítulo presenta un modelo matemático correspondiente a una esfera robótica de dicho tipo. Además, con el objetivo de visualizar los resultados del mencionado modelo, se presenta una interfaz de simulación, que ha permitido estimar el comportamiento del robot previo a su construcción.

4.1. Modelo cinemático

El modelo cinemático permite expresar la configuración del robot (posición y orientación) según el valor de las articulaciones, y viceversa. Para el caso de la esfera robótica desarrollada en este proyecto, el modelo cinemático tiene dos objetivos claramente definidos. El primero de ellos es estimar la posición del CM respecto al CG del robot, esto permite calcular, junto con el modelo dinámico explicado en la siguiente sección, la respuesta del sistema. El segundo objetivo va dirigido a la visualización del modelo de simulación del robot, ya que mediante este modelo es posible definir una posición y

4. ROSPHERE: MODELADO Y SIMULACIÓN

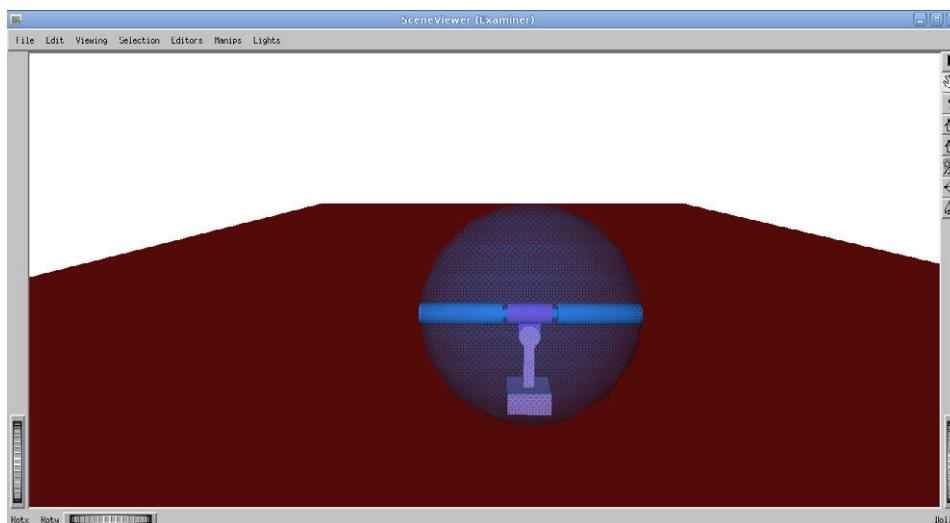


Figura 4.1: Entorno de simulación 3D que permite visualizar el comportamiento dinámico de ROSPHERE. Esta representación presenta mediante una animación la solución de las ecuaciones de movimiento del sistema, incluyendo la descripción física de los cuerpos que la conforman y el efecto de fricción de la esfera con la superficie de desplazamiento.

orientación de cada uno de los cuerpos que conforman el sistema, información que es utilizada por el simulador (ver Sección 4.3).

Para efectos de simulación y visualización, uno de los objetivos propuestos de este modelo cinemático, el sistema puede ser considerado como una cadena cinemática de cuerpos rígidos de base flotante. Donde la base flotante es el cuerpo esférico y está restringido en movimiento por el contacto con la superficie de contacto. Dicho cuerpo además es base de una cadena abierta de 3 cuerpos rígidos que conforman el mecanismo interno del robot. Las siguientes secciones explican por una parte, la cadena cinemática que describe la configuración del cuerpo esférico (base flotante) en un espacio 3-dimensional respecto a un sistema de referencia inercial y, por otra parte, la cadena cinemática de los cuerpos del mecanismo interno respecto al CG del robot.

4.1.1. Modelo cinemático: cuerpo esférico como base flotante

Para expresar la posición y orientación de la base flotante se presenta una alternativa mediante la cual se modela cinemáticamente mediante 6 articulaciones virtuales, que permiten expresar cualquier posición y orientación del cuerpo base en el espacio 3-dimensional. Estas articulaciones, 3 GdL traslacionales y 3 GdL rotacionales, permiten

expresar posiciones X, Y, Z y orientaciones $Roll, Pitch, Yaw$ respectivamente, como se ve en la figura 4.2. Esta disposición de GdL, con sus respectivos sistemas de referencia, ha sido propuesta por Roy Featherstone(51)¹.

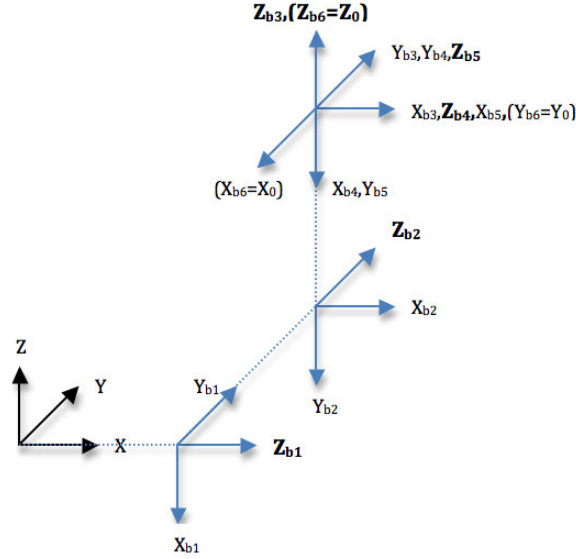


Figura 4.2: Marcos o sistemas de referencia de la base flotante dispuestos como lo sugiere Roy Featherstone en su librería de simulación de sistemas de cuerpos rígidos(51).

De manera similar al estándar definido por Denavit-Hartenberg (52) (convención DH), pero específicamente con la modificación de ésta, presentada por Craig (53) (convención MDH), los ejes Z_i de los sistemas de referencia de los cuerpos virtuales coinciden con los ejes articulares adicionados, como se puede apreciar en **negrilla** en la Figura 4.2. Otro aspecto importante de esta descripción cinemática de la base, es que el sexto marco de referencia coincide con el primer cuerpo real, es decir, el cuerpo (esférico) base flotante, y se ubica en el CG de dicho cuerpo. Dado el tipo de movimiento realizado por la esfera robótica, la variación de la base en posición y en orientación descritas través de las articulaciones virtuales, está definida como se describe en la tabla 4.1.

El modelo cinemático de la base flotante, propuesto por Roy Featherstone(51), modela la trayectoria de dicho cuerpo como si éste fuera el efector final de un robot de 6 DOF (3 traslacionales y 3 rotacionales). La solución cinemática inversa para este sistema fue presentada e implementada por el mismo autor². A continuación se analizan

¹<http://royfeatherstone.org/spatial/index.html>

²<http://royfeatherstone.org/spatial/v2/index.html>

4. ROSPHERE: MODELADO Y SIMULACIÓN

Base Flotante de 6 DOF			
Cuerpo	Q_i	Articulación	Dirección en Sistema inercial
O_{b1}	X_{esf}	Prismática	X
O_{b2}	X_{esf}	Prismática	Y
O_{b3}	Z_{Resf}	Prismática	Z
O_{b4}	$Roll_{esf}$ rad	Rotacional	X
O_{b5}	$Pitch_{esf}$ rad	Rotacional	Y
$O_{b6} = O_0$	Yaw_{esf} rad	Rotacional	Z

Tabla 4.1: Valores articulares de la base flotante para el caso del caminante robótico.

dichas ecuaciones, que fueron adaptadas a los requerimientos de este proyecto.

La posición y orientación de un cuerpo en el espacio puede ser expresado por medio de una matriz de transformación homogénea, como se muestra en la ecuación 4.1, que para el caso de los parámetros MDH, la ecuación estaría dada de la forma que se presenta en la Ecuación 4.2. Ésta permite relacionar el sistema de referencia del cuerpo con otro sistema de referencia que puede estar ligado a otro cuerpo.

$$T_{i,\lambda(i)} = \begin{bmatrix} r_{i,\lambda(i)} & p_{\lambda(i),i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} T_{i,\lambda(i)} &= TranslX(a_{i-1}) \cdot RotX(\alpha_{i-1}) \cdot TranslZ(d_i) \cdot RotZ(\theta_i) \\ &= \begin{bmatrix} r_{i,\lambda(i)} & p_{\lambda(i),i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ c\alpha_{i-1} \cdot s\theta_i & c\alpha_{i-1} \cdot c\theta_i & -s\alpha_{i-1} & -d_i \cdot s\alpha_{i-1} \\ s\alpha_{i-1} \cdot s\theta_i & s\alpha_{i-1} \cdot c\theta_i & c\alpha_{i-1} & d_i \cdot c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.2)$$

En el caso de la base flotante, se obtiene la relación en orientación y posición de la base flotante $O_{b6} = O_0$ con respecto al sistema inercial O_{iner} . Para la descripción de la posición y orientación de cada uno de los cuerpos del sistema, virtuales y reales, se ha empleado el álgebra espacial, la cual permite una notación compacta 6-dimensional. Esta notación ha sido utilizada por simplicidad al momento de realizar la simulación y visualización, ya que la librería utilizada está basada en estos operadores. Mayor detalle sobre la notación espacial se puede encontrar en el Anexo B.

Para realizar una descripción equivalente a la presentada en la ecuación 4.4, donde se define una operación traslacional y rotacional, pero en el espacio 6-dimensional se tiene que

$$\hat{X}_{ine,b6} = \hat{R}_{b6,ine}^T \cdot \hat{P}_{ine,b6}^T \quad (4.3)$$

$$T_{b6,ine} = \begin{bmatrix} r_{b6,ine} & p_{ine,b6} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

donde $\hat{P}_{ine,b6}^T$ y $\hat{R}_{ine,b6}^T$ son operadores de traslación y rotación respectivamente, los cuales se definen de la siguiente forma:

$$\hat{P}_{ine,b6}^T = \begin{bmatrix} U & 0 \\ -\tilde{p}_{ine,b6} & U \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

donde $\tilde{p}_{ine,b6}$ es la matriz skew simétrica, utilizada en el producto cruz de vectores:

$$\tilde{p}_{ine,b6} = \begin{bmatrix} 0 & -pz_{ine,b6} & py_{ine,b6} \\ pz_{ine,b6} & 0 & -px_{ine,b6} \\ -py_{ine,b6} & px_{ine,b6} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Finalmente se define el operador espacial de rotación:

$$\hat{R}_{ine,b6}^T = \begin{bmatrix} r_{ine,b6}^T & 0 \\ 0 & r_{ine,b6}^T \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Combinando los operadores previamente mencionados se obtiene:

$$\begin{aligned} \hat{X}_{ine,b6} &= \hat{R}_{b6,ine}^T \cdot \hat{P}_{ine,b6}^T \\ &= \begin{bmatrix} r_{b6,ine}^T & 0 \\ 0 & r_{b6,ine}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U & 0 \\ -\tilde{p}_{ine,b6} & U \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} r_{b6,ine}^T & 0 \\ -r_{b6,ine}^T \cdot \tilde{p}_{ine,b6} & r_{b6,ine}^T \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Teniendo en cuenta la ecuación 4.4, donde se define la matriz homogénea con los componentes $r_{b6,ine}$ y $p_{ine,b6}$, estos pueden ser obtenidos del operador espacial presentado en la ecuación 4.8. Para obtener la posición en el espacio cartesiano respecto al sistema inercial, se realiza la siguiente transformación de la submatriz del operador espacial:

4. ROSPHERE: MODELADO Y SIMULACIÓN

$$\begin{aligned}\tilde{p}_{ine,b6} &= -r_{b6,ine} \cdot \hat{X}_{ine,b6}(4:6, 1:3) \\ &= -r_{b6,ine} \cdot (-r_{b6,ine}^T \cdot \tilde{p}_{ine,b6})\end{aligned}$$

Teniendo la matriz skew simétrica, definida de la forma presentada en la ecuación B.5, se puede obtener el vector Cartesiano definido como:

$$p_{ine,b6} = [p_{x_{ine,b6}} \quad p_{y_{ine,b6}} \quad p_{z_{ine,b6}}] \quad (4.9)$$

Luego, la definición de los 3 DOF traslacionales de la base se pueden mapear de un espacio de coordenadas externas a unas coordenadas internas de las articulaciones virtuales, asumiendo que los 3 primeros DOF coinciden con las direcciones X , Y y Z del sistema inercial, de la siguiente manera:

$$Q_{base}(1:3) = p_{ine,b6} \quad (4.10)$$

Por medio de la solución analítica de la transformación homogénea de la base al sistema inercial se obtiene lo siguiente¹:

$$Q_b(5) = atan2 \left(r_{b6,ine}^T(3,1), \sqrt{\left(r_{b6,ine}^T(1,1) \right)^2 + \left(r_{b6,ine}^T(2,1) \right)^2} \right)$$

$$Q_b(6) = atan2 \left(-r_{b6,ine}^T(2,1), r_{b6,ine}^T(1,1) \right)$$

$$Si \left(r_{b6,ine}^T(3,1) > 0 \right)$$

$$Q_b(4) = atan2 \left(r_{b6,ine}^T(2,3) + r_{b6,ine}^T(2,1), r_{b6,ine}^T(2,2) - r_{b6,ine}^T(1,3) \right) - Q_b(6)$$

Sino

$$Q_b(4) = atan2 \left(r_{b6,ine}^T(2,3) + r_{b6,ine}^T(2,1), r_{b6,ine}^T(2,2) - r_{b6,ine}^T(1,3) \right) + Q_b(6)$$

Con lo anterior se completa la solución cinemática para las 6 articulaciones virtuales de la base.

¹<http://royfeatherstone.org/spatial/v2/sourceText/fbkin.txt>

4.1.2. Modelo cinemático: mecanismo interno

Luego de definir un modelo cinemático que permite expresar la posición y orientación del cuerpo base, que en este caso resulta ser el cuerpo esférico del robot, es necesario definir un modelo adicional que permita conocer la configuración del mecanismo interno. Aunque en este caso, la información más relevante resulta ser la posición del último cuerpo, puede deber ser sobre éste donde se ubique el CM del toda la esfera, la descripción final debe incluir toda la información necesaria en posición y orientación, con el fin de ser generalizado para el uso del visualizador utilizado.

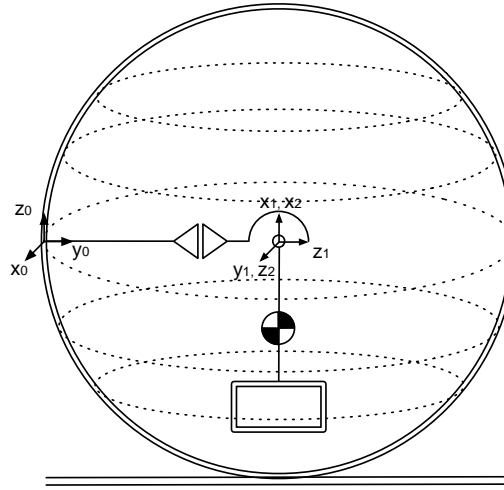


Figura 4.3: Diagrama cinemático de la esfera robótica del cual se pueden extraer los parámetros cinemáticos según la convención modificada de Denavit-Hartenberg (MDH).

La Figura 4.3 presenta un diagrama del cual se pueden extraer los parámetros cinemáticos de la esfera robótica. Este diagrama muestra un sistema de 3 cuerpos rígidos y 2 GdL, los cuales son caracterizados mediante sistemas Cartesianos de referencia. Dichos sistemas han sido dispuestos según lo define Craig (53), quien propone una modificación de la convención original definida por Denavit-Hartenberg (52). La particularidad de esta convención radica en la ubicación del sistema de coordenadas, ya que en el caso MDH el eje Z_i es coincidente con la articulación i .

Además, en la Figura 4.3, se puede apreciar que el CM del robot se ubica a lo largo de un eje que une el CG con la masa colgante. Esto se debe a que el objetivo del mecanismo es, en especial con su masa colgante, bajar el CM en lo posible al límite

4. ROSPHERE: MODELADO Y SIMULACIÓN

del interior del cuerpo esférico. Este es un criterio de diseño que se ve reflejado en aspectos mencionados en el Capítulo 3 y en la Sección 4.2 de este capítulo. El resultado de este modelo son los parámetros MDH del sistema, los cuales permiten resolver el problema cinemático directo, que permite estimar la posición del CM respecto al sistema de referencia del cuerpo esférico, y es utilizado para la visualización en el entorno de simulación utilizado. Dichos parámetros se sintetizan en la Tabla 4.2

Link	a_{i-1}	α_{i-1}	θ_i	d_i
1	$-\frac{p_i}{2}$	0	$\theta_i - \frac{\pi}{2}$	0
2	$-\frac{p_i}{2}$	0	0	0

Tabla 4.2: Parámetros MDH del mecanismo interno de la esfera robótica

4.2. Modelo dinámico

En esta sección se presenta un modelo dinámico que sintetiza algunas aportaciones, con las cuales se logra entender el comportamiento dinámico del sistema (27, 34, 46). Algunas consideraciones adicionales que no aportan un punto de diferencia al objetivo de este proyecto pueden encontrarse en (30, 37, 39, 40, 43, 47).

En el análisis presentado, se asume que la dinámica del sistema puede ser separada en 2 partes (ver Figura 4.4), como ha sido propuesto y demostrado por Kayacan *et al.*(47). Por una parte, se tiene un modelo que describe la dinámica encargada de inducir movimientos hacia adelante y atrás, la cual se mencionará desde este momento como *dinámica de marcha* y está relacionada con las acciones aplicadas sobre el primer GdL (ver Figura 4.4a). Por otra parte, se tiene la denominada *dinámica de giro*, la cual, como su nombre lo indica, es la encargada de hacer que la esfera realice trayectorias curvas y está relacionada con el segundo GdL (ver Figura 4.4b). El efecto combinado de estos movimientos hacen de la esfera robótica desarrollada en en esta investigación, un robot móvil con características de un sistema no-holonómico.

4.2.1. Dinámica de marcha

Esta sección presenta el conjunto de ecuaciones de movimiento que resuelve la denominada *dinámica de marcha*. Para esto existen dos alternativas en cuanto a la formulación matemática se refiere. Por una parte, se tienen las ecuaciones descritas mediante

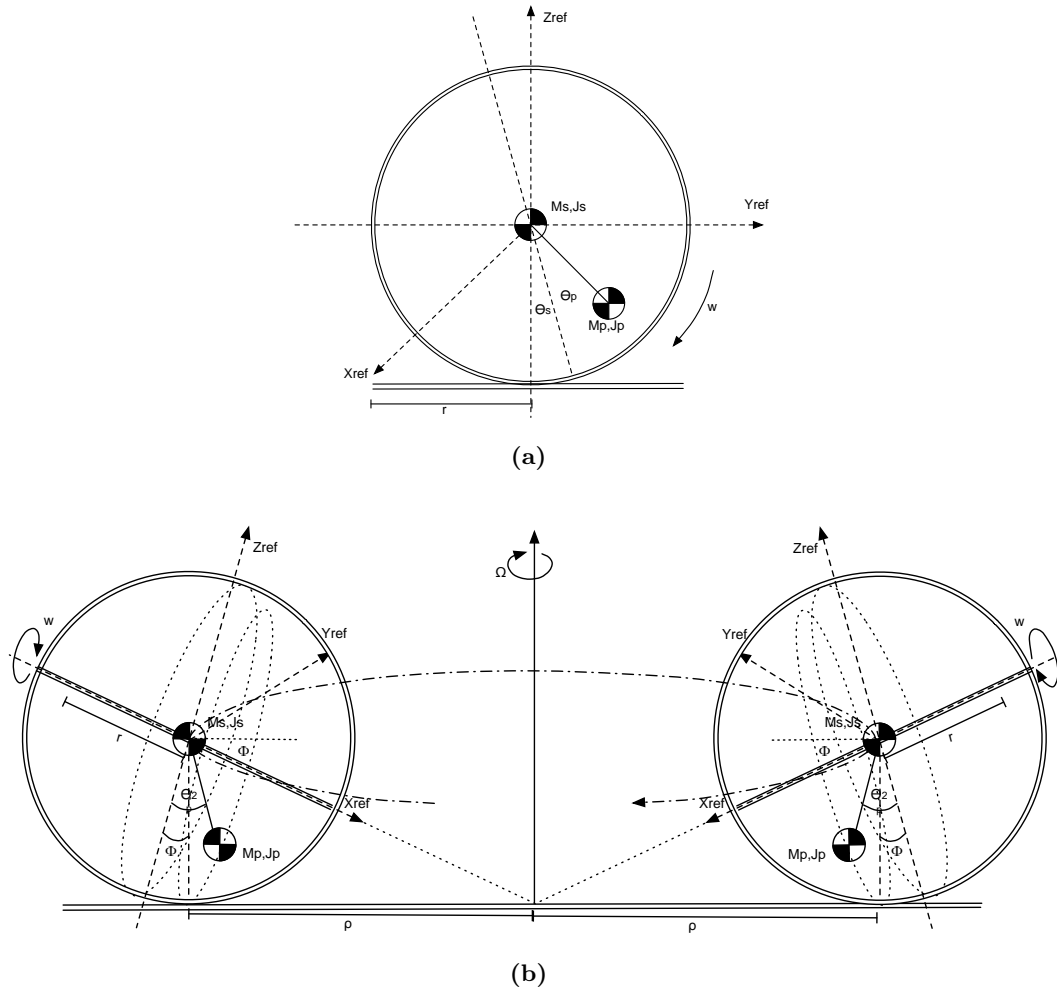


Figura 4.4: Análisis desacoplado de la mecánica del sistema. Las ecuaciones son separadas según el efecto que genera cada uno de los actuadores. En (a) se presentan las cantidades relacionadas en los movimientos hacia delante y atrás, aquellos necesarios para resolver la *dinámica de marcha*. En (b) se presentan aquellas involucradas en el análisis de la *dinámica de giro* del robot.

4. ROSPHERE: MODELADO Y SIMULACIÓN

la formulación de Newton, como ha sido presentado por Halme *et al.* (27). No obstante, en este proyecto se ha optado por la segunda alternativa, donde las ecuaciones han sido desarrolladas utilizando la formulación de Lagrange y se basan en el análisis presentado por Koshiyama *et al.* (46), quienes estudian el movimiento inducido en un cuerpo esférico por masa móvil que se desplaza en su interior. Partiendo de esto, diferentes autores han desarrollado, de manera similar a la presentada en este documento, las consideraciones necesarias para extender las ecuaciones con el objetivo de tener en cuenta el efecto del movimiento de un sistema pendular en el interior de un cuerpo esférico (21, 34).

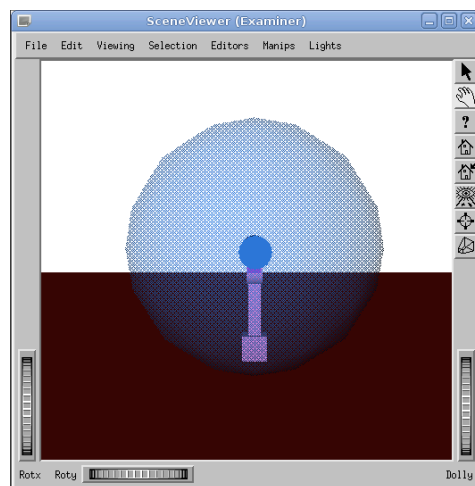


Figura 4.5: Entorno de simulación realizando una trayectoria recta resolviendo la dinámica de marcha. Para realizar este tipo de simulaciones se restringe el movimiento de la esfera robótica hacia delante y atrás.

4.2.1.1. Dinámica de marcha: desarrollo matemático

Una primera suposición que se hace para este análisis es que el movimiento de la esfera se encuentra restringido a un plano (*i.e.*, movimiento hacia delante y atrás). Considerando esto, el robot podría ser analizado como un sistema de dos cuerpos rígidos con un GdL entre ellos (ver Figuras 4.4a y 4.5). Por lo tanto, las ecuaciones de la Lagrange estarían dadas como se presenta a continuación. El Lagrangiano general de un sistema está definido como:

$$\mathcal{L} = K - U \quad (4.11)$$

Donde K es la energía cinética del sistema e incluye las aportaciones de energía del cuerpo esférico (K_s , ver Ecu. 4.12) y del péndulo (K_p , ver Ecu. 4.13). Por otra parte, U se define como la energía potencial y está compuesta, igualmente, por las cantidades de la esfera (U_s , ver Ecu. 4.14) y del péndulo (U_p , ver Ecu. 4.15). De esta manera, considerando que el cuerpo esférico se mueve sobre una superficie plana y la altura del mismo se mantiene constante, la energía potencial del cuerpo esférico es igual a cero (Ecu. 4.14). Sin embargo, la energía potencial del cuerpo del péndulo dependerá del ángulo del mismo respecto a un eje perpendicular, como se puede apreciar en la Ecuación 4.15. Por otra parte, las energías cinéticas del cuerpo esférico y del péndulo incluyen los efectos generados no solo por los movimientos lineales, sino también por los rotacionales, como se puede apreciar en las Ecuaciones 4.12 y 4.13.

$$K_s = \frac{1}{2}M_s \left(r.\dot{\theta}_s \right)^2 + \frac{1}{2}J_s\dot{\theta}_s^2 \quad (4.12)$$

$$K_p = \frac{1}{2}M_p \left[\left(r.\dot{\theta}_s - l.\cos(\theta_s + \theta_p) \left(\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_p \right) \right)^2 + \left(l.\sin(\theta_s + \theta_p) \left(\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_p \right) \right)^2 \right] + \frac{1}{2}J_p \left(\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_p \right)^2 \quad (4.13)$$

$$U_s = 0 \quad (4.14)$$

$$U_p = -M_p.g.l.\cos(\theta_s + \theta_p) \quad (4.15)$$

Reemplazando las Ecuaciones 4.14, 4.15, 4.12, 4.13 en 4.11, $\mathcal{L} = K_s + K_p - U_p$, las ecuaciones de movimiento descritas por el Lagrangiano estarían dadas de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_s} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_s} = -\tau + \tau_f \quad (4.16)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_p} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_p} = \tau \quad (4.17)$$

4. ROSPHERE: MODELADO Y SIMULACIÓN

Donde τ y τ_f son el par aplicado por el actuador sobre la articulación y el par de fricción (entre la superficie y la esfera), respectivamente. De esta manera, la ecuación de movimiento de cada uno de los cuerpo rígidos estaría dada como:

$$\begin{aligned}
 -\tau + \tau_f = & \left((M_s + M_p) r^2 + M_p \cdot l^2 + J_s + J_p - 2M_p \cdot r \cdot l \cdot \cos(\theta_s + \theta_p) \right) \ddot{\theta}_s + \\
 & \left(M_p \cdot l^2 + J_p - M_p \cdot r \cdot l \cdot \cos(\theta_s + \theta_p) \right) \ddot{\theta}_p + \\
 & M_p \cdot r \cdot l \cdot \sin(\theta_s + \theta_p) \left(\dot{\theta}_s + \dot{\theta}_p \right)^2 + \\
 & M_p \cdot g \cdot l \cdot \sin(\theta_s + \theta_p)
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

$$\begin{aligned}
 \tau = & \left(M_p \cdot l^2 - M_p \cdot r \cdot l \cdot \cos(\theta_s + \theta_p) + J_p \right) \ddot{\theta}_s + \\
 & \left(M_p \cdot l^2 + J_p \right) \ddot{\theta}_p + \\
 & M_p \cdot g \cdot l \cdot \sin(\theta_s + \theta_p)
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

Finalmente, las Ecuaciones 4.18 y 4.19 pueden ser agrupadas y ordenadas, de manera que se presentan como una ecuación matricial de movimiento en su forma canónica de la siguiente manera:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) - F_{ext} = \tau \tag{4.20}$$

Donde $M(q)$ es la matriz de masa del sistema, la cual depende de la configuración del sistema ($q = [\theta_s, \theta_p]^T$), $C(q, \dot{q})$ son los términos de Coriolis y centrífuga (dependientes de velocidad), $G(q)$ son los términos de gravedad, F_{ext} son las fuerzas externas (*e.g.*, fricción), y τ son las fuerzas aplicadas por los actuadores.

4.2.1.2. Dinámica de marcha: descripción geométrica de los cuerpos

Las Ecuaciones 4.18 y 4.19 presentan la relación dinámica entre las variables de entrada de control, como lo es el par aplicado en la articulación que une el cuerpo esférico y el péndulo, y la respuesta del sistema expresada en las aceleraciones de los cuerpos. Parte de esta solución matemática incluye la descripción de los cuerpos involucrados, y dado que los mismos no se consideran como masas puntuales, es necesario el cálculo y estimación de parámetros como la masa y los tensores de inercia.

En una primera etapa de diseño del robot, las simulaciones del modelo presentado han incluido los parámetros de masa calculados a partir del uso de cuerpos rígidos

como cilindros y prismas rectangulares (como cubos), los cuales se consideran que están contruidos con materiales de masa y distribución uniforme, de manera que el cálculo de los parámetros como Centro de Masa (CM) y tensor de inercia se simplifica. Para la dinámica de marcha, como ya se ha mencionado, se define el sistema de 2 cuerpos rígidos y 1 GdL (ver Figuras 4.4a y 4.5). Estos cuerpos serían la esfera y el eje principal, que en conjunto sería el primer cuerpo rígido, y la masa colgante que completa el sistema pendular (ver Figura 4.6). Para éstos se han calculado los diferentes parámetros cinemáticos y dinámicos. En el caso de los parámetros de masa, se han utilizado las ecuaciones presentadas en el Anexo A.

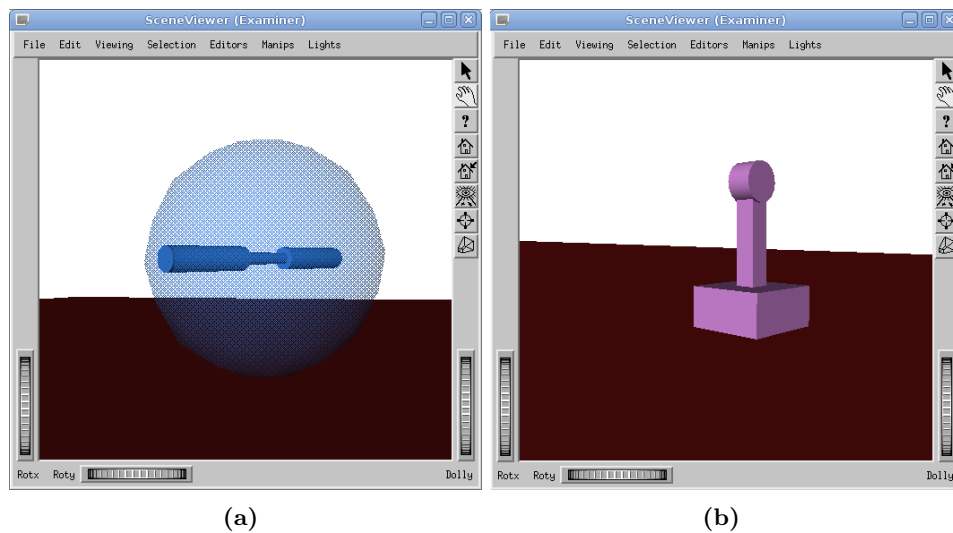


Figura 4.6: Sistema de cuerpos rígidos que simulan y resuelven la dinámica de marcha. En (a) se muestra el primer cuerpo rígido, de forma esférica y que incluye los soportes del eje principal. En (b) se muestra el segundo cuerpo rígido, el cual incluye una masa colgante que hace parte del sistema pendular.

Sin embargo, es importante mencionar que los valores de los tensores de inercia y vectores al CM calculados para los sólidos de la Figura 4.6, han sido utilizados para entender y estimar el comportamiento dinámico del robot y han sido referencia en los criterios de diseño. Sin embargo, dichos valores pueden ser reemplazados por los obtenidos por un software CAD, como Invento®, el cual aporta valores más aproximados según la geometría real de las piezas que conforman el robot.

4. ROSPHERE: MODELADO Y SIMULACIÓN

4.2.2. Dinámica de giro

Finalmente, para completar el modelo matemático que describe el comportamiento dinámico de una esfera robótica tipo *masa pendular con eje fijo*, es necesario definir un modelo matemático que permita describir movimientos giros en los desplazamientos del robot. Para esto, es necesario incluir en el análisis la respuesta del sistema frente a acciones realizadas por el segundo GdL (*i.e.*, θ_{2p}), el cual se considera capaz de inducir una inclinación en la inclinación del robot, específicamente en el ángulo Roll del robot (Φ), ver Figura 4.4b.

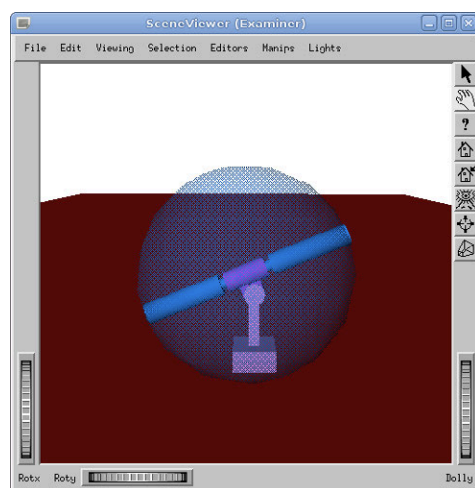


Figura 4.7: Entorno de simulación realizando visualizando el robot en una configuración típica de la dinámica de giro.

Considerando las condiciones de operación en las que se ha probado hasta el momento el robot, se asume que robot realiza desplazamientos a baja velocidad ($3 - 4 \frac{m}{s}$). Esto es importante al momento de definir la dinámica de giro, ya que desplazamientos a velocidades mayores pueden implicar efectos de Coriolis, es decir, fuerzas dependientes de velocidad.

Cuando esta condición de desplazamientos a bajas velocidades se cumple, hay un equilibrio entre la fuerza y el par (incluyendo la fuerza centrífuga generada por el giro), lo que implica que la esfera sigue una circunferencia ρ y $\theta_{2p} = \Phi$ (ver Figura 4.4b).

$$\rho = \frac{r}{\tan(\theta_{2p})} \quad (4.21)$$

Por otra parte, la velocidad angular de giro Ω puede ser calculado de la siguiente manera:

$$\Omega = \omega \cdot \sin(\theta_{2p}) \quad (4.22)$$

4.3. Sistema de simulación

Como se ha mencionado al inicio de este capítulo, el modelo matemático de un sistema sirve como referencia para entender el comportamiento dinámico del mismo. Las secciones anteriores han expuesto las ecuaciones físicas que rigen una esfera robótica como la desarrollada en este proyecto. Adicional a dicho desarrollo matemático, se ha definido un sistema de simulación mediante el cual es posible visualizar la respuesta del sistema.

Las ecuaciones de movimiento han sido codificadas en Matlab®, en donde se han definido estructuras de datos que describen los diferentes parámetros cinemáticos y dinámicos de la esfera robótica. Para las animaciones se ha utilizado el visor de escenas OpenInventor, el cual presenta películas hechas como una secuencia de configuraciones de sólidos en un espacio 3-dimensional. Para la generación de animaciones ordenadas, donde se representan cadenas cinemáticas ramificadas y/o seriales, de cuerpos rígidos acoplados entre sí, se han utilizado funciones de la librería de simulación desarrollada por Roy Featherstone¹.

Para realizar animaciones como las presentadas en las Figuras 4.1, 4.5, 4.6 y 4.7, es necesario definir una estructura que contenga la información de los parámetros cinemáticos de los cuerpos involucrados, esto se hace por medio de un operador espacial que reúne la información de la posición y orientación. Estos operadores se definen mediante la Ecuación B.6 presentada en el Anexo B. Adicional a esta información, es necesario especificar los sólidos que conforman cada uno de los cuerpos rígidos del sistema, los cuales son expresados respecto al sistema de referencia local de cada cuerpo, un ejemplo de esto se puede apreciar en la Figura 4.6a, donde se representa el cuerpo rígido esférico del robot, el cual incluye la coraza esférica, el eje principal y los soportes que se fijan al cuerpo esférico.

¹<http://royfeatherstone.org/spatial/v1/documentation.html>

4. ROSPHERE: MODELADO Y SIMULACIÓN

Es importante mencionar que esta librería de visualización está diseñada para simular cadenas seriales y ramificadas de cuerpos rígidos, y para ello también incluye algoritmos para la solución computacional de la dinámica de dichos sistemas, los cuales son de complejidad temporal lineal, $O(n)$, donde n es igual al número de cuerpos rígidos del sistema, para solucionar numéricamente la Ecuación 4.20, *i.e.*, los problemas de dinámica inversa y directa. Para el uso de estas ecuaciones, las estructuras de entrada del simulador cuentan con un parámetro adicional, inercial espacial (ver Ecuación B.2), que permite describir los parámetros de masa de los cuerpos.

5

ROSPHERE: Arquitecturas hardware y software

ROSPHERE es una plataforma concebida para ser utilizada como un robot con características de sensor móvil, el cual debe estar en la capacidad de realizar diferentes tipos de mediciones y de integrarse en un Sistema Multi-Robot (SMR). Para ello, ROSPHERE cuenta con una arquitectura hardware/software versátil y robusta, la cual le permite realizar comunicaciones con otro tipo de sistemas similares y/o diferentes (SMR heterogéneo), además está diseñado para operarse de manera remota o de manera autónoma. Este capítulo presenta las diferentes consideraciones de dicha arquitectura, así como los elementos que la conforman, incluyendo un análisis detallado de la conexión y relación entre las capas de hardware y software.

5.1. Arquitectura hardware

La arquitectura hardware del robot está compuesta por sus elementos físicos de procesamiento, sensado y actuación. Dichos elementos han sido seleccionados según las especificaciones y requerimientos presentados a lo largo de este documento. Entre éstos se encuentra la capacidad de operación autónoma de ROSPHERE, lo que exige que su sistema de cómputo sea capaz no solo de adquirir datos, sino que además debe poder procesarlos y tomar decisiones a partir de su resultado. La arquitectura hardware, a su vez, ha sido dividida en dos capas, la denominada de *alto nivel* y la de *bajo nivel*. Estos y otros aspectos que conforman el conjunto hardware del robot son presentados

5. ROSPHERE: ARQUITECTURAS HARDWARE Y SOFTWARE

en esta sección.

5.1.1. Conexiones de bajo nivel

La capa de bajo nivel de la arquitectura hardware incluye los diferentes sensores y actuadores del robot, así como las respectivas conexiones al procesador encargado de la lectura y escritura de datos en ellos. Dados los requerimientos y especificaciones, se ha realizado una búsqueda de un sistema que permitiese la conexión física de diferentes tipos de sensores y actuadores. Como resultado de dicha búsqueda, se ha seleccionado la tarjeta RoboveroTM (ver Figura 5.1).

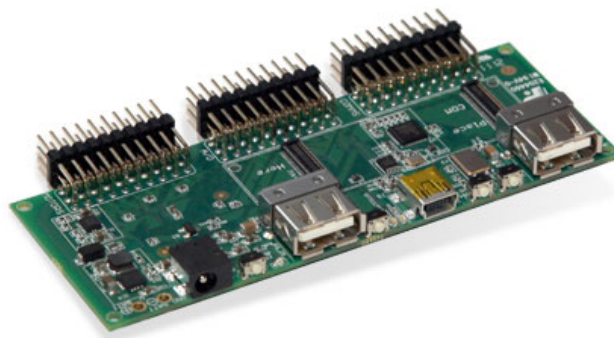


Figura 5.1: RoboveroTM. Tarjeta electrónica principal de ROSPHERE que cuenta, entre otros elementos, con un microcontrolador embebido, una unidad de medida inercial, puertos para conexión de dispositivos de protocolos I2C, UART, SPI, PWM, etc. Ésta puede ser controlada desde un ordenador externo conectado a través de un puerto USB o mediante un ordenador embebido en la tarjeta.

RoboveroTM es una tarjeta electrónica para aplicaciones robóticas¹, la cual tiene como principales características un microcontrolador, una unidad de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés) de 9 GdL, electrónica de potencia necesaria para conexión de motores, así como un HUB USB. El microcontrolador, a su vez, permite conexiones con diferentes dispositivos de entrada/salida, entre los cuales se incluyen protocolos I2C, UART, SPI, PWM, A/D, etc. Dichas conexiones han sido habilitadas como puertos en la tarjeta. Por lo tanto, RoboveroTM no es en sí un sistema cómputo embebido, sino una tarjeta de conexión de periféricos. Sin embargo, el microcontrolador embebido en la tarjeta cuenta con un conjunto de instrucciones (firmware). Dichas instrucciones son recibidas a través del puerto USB, pudiendo ser enviadas desde un ordenador externo

¹<http://robovero.org/>

o embebido (tipo overo¹), y le indican al microcontrolador cómo interactuar con los periféricos. En resumen, la capa de bajo nivel está compuesta por la tarjeta RoboveroTM, su procesador embebido y los dispositivos que se conectan a éste. A continuación se realiza una descripción de dichos elementos.

5.1.1.1. Procesador

RoboveroTM cuenta con el microcontrolador LPC1769 de la familia Cortex-M3, con una frecuencia de reloj de 120 MHz, el cual incluye una memoria flash de 512 kB, 64 kB de memoria de datos, puertos USB, 8 canales tipo DMA, 4 puertos serie tipo UART, 2 canales CAN, 3 puertos SPI, 3 canales SPI, 12 canales de conversión analógica-digital de 12 bit, canales de conversión digital-analógica de 10 bit, canales PWM, temporizadores, etc. La tarjeta principal donde se aloja este microcontrolador ha agrupado en 3 grupos diferentes de los periféricos mencionados (ver Figura 5.1), uno que contiene aquellos periféricos dedicados a las comunicaciones, otro dedicado a las interfaces analógicas y el último para la conexión de motores.

5.1.1.2. Sensores

ROSPHERE cuenta con diferentes de sensores, algunos utilizados para conocer el estado propio del robot, mientras que otros se utilizan para las tareas de exploración, inspección y medición de variables físicas, como las necesarias en las aplicaciones propuestas para el robot. De esta manera, los sensores son clasificados y presentados en el siguiente orden:

- **Los sensores propioceptivos** son aquellos que aportan información de la condición o configuración actual del robot, particularmente ROSPHERE cuenta con los siguientes sensores que pertenecen a este grupo:
 - Unidad de medición inercial o IMU. RoboveroTM cuenta con una IMU de 9 GdL que posee un acelerómetro y magnetómetro (LSM303DLH), así como un giróscopo (L3G4200D), de los cuales se obtiene información en los tres ejes cartesianos *i.e.*, X, Y, Z. De la combinación y procesamiento de esta información se puede conocer la actitud del robot, resumida en los ángulos de

¹<https://www.gumstix.com/store/index.php?cPath=33>

5. ROSPHERE: ARQUITECTURAS HARDWARE Y SOFTWARE

alabeo (*roll*), cabeceo (*pitch*) y guiñada (*yaw*). Estos sensores se comunican al microcontrolador de la tarjeta mediante protocolo I2C.

- Dispositivo del Sistema de Posicionamiento Global o GPS. Éste es utilizado para obtener las coordenadas del robot, además proporciona información adicional como la velocidad de desplazamiento. Este sensor transfiere su información mediante protocolo serie. La referencia del GPS utilizado es EM-406A y sus principales características son 10m de precisión en posición, 5m de precisión con Sistema de Aumentación Basado en Satélites (WAAS) activado, protocolo NMEA de datos, y una frecuencia aproximada de 5Hz. Las dimensiones son de 30mmX30mmX10,5mm $\pm 0,2mm$ con un peso 16g.
- **Los sensores exteroceptivos** son aquellos que aportan información externa del robot. En su desarrollo actual, ROSPHERE cuenta con algunos sensores de este tipo, no obstante el diseño original del firmware de la arquitectura permite la adición de otros sensores. Los siguientes son los sensores que se han conectado al robot y con los cuales se han realizado pruebas de mediciones:
 - Sensor analógico de temperatura (LM35). Es un sensor de bajo coste que cuenta con una precisión de 0,5°C, con rango de los $-55^{\circ}C$ hasta $+150^{\circ}C$. Es conectado a la tarjeta RoboveroTM a través de uno de sus canales de conversión analógica/digital.
 - Sensor analógico de luminosidad (fotorresistencia). Es un componente que varía su resistencia según la intensidad de luz incidente, de manera que a mayor intensidad de luz, menor es el valor de su resistencia eléctrica. Al aplicar una tensión en un divisor de tensión, donde una de la resistencia es de valor fijo y la otra es la fotorresistencia, la variación de la tensión medida en el divisor indica la variación en la luminosidad. Dicha variación es medida por medio de uno de los canales de conversión A/D de la tarjeta RoboveroTM.
 - Sensor digital de humedad relativa y temperatura (SHT71). Es un sensor que entrega la información de temperatura y humedad mediante un protocolo serial no estándar (puede conectarse a un bus I2C para obtener la información de reloj, pero se debe generar un protocolo específico). Tiene una precisión típica de $\pm 3,0\%$ HR (humedad relativa) y $\pm 0,4^{\circ}C$ HR (humedad relativa).

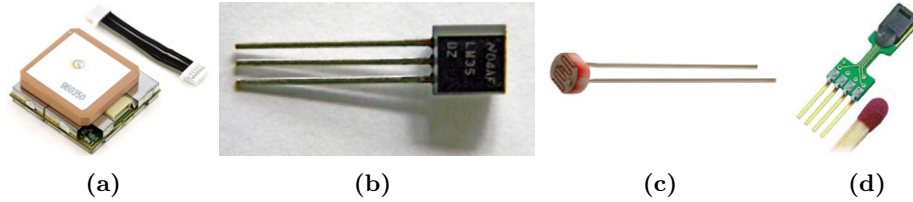


Figura 5.2: Sensores propioceptivos: (a) GPS, para posicionamiento y navegación. Sensores exteroceptivos: (b) LM35 sensor analógico para la temperatura. (c) Fotorresistencia, sensor analógico para para la luminosidad. SHT71 sensor digital para la temperatura y humedad.

5.1.1.3. Actuadores

ROSPHERE, como se ha mencionado previamente, cuenta con un sistema interno pendular de dos GdL. Este mecanismo cuenta con un primer GdL de rotación continua, mientras que el segundo GdL tiene un movimiento limitado (otros detalles pueden ser consultados en el Capítulo 3). Para la selección de los actuadores de dichos GdL, se tuvo en cuenta el modelo dinámico presentado en el Capítulo 4, mediante el cual se dimensionaron los motores. El resultado ha sido la selección de dos servomotores idénticos de alto torque (HS-7954SH¹). Uno de estos servomotores ha sido modificado mecánica y eléctricamente para tenga la capacidad de realizar giros continuo.

5.1.1.4. Baterías

RoboveroTM cuenta con la opción de conectarse a una fuente de energía regulada o el uso de baterías externas. Dado que ROSPHERE es plataforma móvil, se ha decidido usar baterías tipo LiPo (Polímero de Litio), de dos celdas (2S, 7,4V) y con una capacidad de 2000mAh. Cabe mencionar que RoboveroTM cuenta con la electrónica de regulación necesaria para la alimentación de los diferentes dispositivos, que utilizan tensiones estándar de 3,3V y 5V.

5.1.2. Conexiones de alto nivel

Por otra parte, la capa de alto nivel de la arquitectura hardware se centra en aquellos elementos de procesamiento y comunicación, que desempeñan funciones dependiendo

¹<http://www.hitecrd.com/products/digital/hv-ultra-premium-digital/not-set.html>

5. ROSPHERE: ARQUITECTURAS HARDWARE Y SOFTWARE

del tipo de operación del robot. En el caso de teleoperación, estos elementos deben recibir la información de comandos de navegación del robot, así como transmitir información referente al estado del robot (sensores). Por otra parte, en el caso de navegación autónoma, estos elementos deben recibir la información de las misiones a realizar, así como procesar la información sensorial del robot para poder ejecutar dicha misión. Además debe estar en la capacidad de comunicación y coordinación con otros sistemas que hagan parte del SMR. Los elementos de esta capa son analizados en las siguientes subsecciones.

5.1.2.1. Sistema de cómputo embebido

Como se ha mencionado, la tarjeta de periféricos RoboveroTM puede ser controlada a través de comandos por el puerto USB, que pueden ser enviados desde un ordenador externo o un sistema embebido. La tarjeta RoboveroTM utilizada en ROSPHERE cuenta con un sistema de cómputo embebido llamado Overo Fire[®] (ver Figura 5.3)¹, el cual tiene como principales características una arquitectura tipo ARM Cortex-A8, velocidad de procesamiento de $720MHz$, RAM de $512MB$ y sistema operativo Linux.



Figura 5.3: Overo Fire[®], sistema de cómputo embebido de alto nivel de ROSPHERE. Cuenta con un procesador a $720MHz$, con $512MB$ RAM y sistema operativo Linux.

5.1.2.2. Sistemas de comunicación

ROSPHERE cuenta con diferentes alternativas de comunicación que están relacionadas con la capa de alto nivel de su arquitectura de Hardware. Algunas de estas alternativas son proporcionadas por el sistema de cómputo mencionado, específicamente la comunicación a través de conexiones WiFi y/o Bluetooth. Sin embargo, otra de las

¹https://www.gumstix.com/store/product_info.php?products_id=227

5.2. Arquitectura software

De manera análoga a lo presentado en la disposición de elementos físicos o hardware del robot, la arquitectura software puede ser dividida en dos partes principales, una capa de bajo nivel y una de alto nivel, las cuales están directamente relacionadas con los niveles en la arquitectura hardware del robot. En esta sección se presentan en detalle cada una de dichas capas, la conexión entre éstas y la interfaz gráfica de teleoperación desarrollada.

5.2.1. Procesamiento de bajo nivel

La capa de bajo nivel en hardware incluye los sensores y actuadores del robot, así como el procesador que los controla. Sobre este último, se ha mencionado que se cuenta con un firmware, el cual contiene un conjunto de instrucciones que le indica al procesador cómo comunicarse con sensores y actuadores, mediante el uso de diferentes periféricos y protocolos como I2C, UART, SPI, etc.

Sin embargo, el firmware aportado por los diseñadores de la tarjeta RoboveroTM posee diferentes problemas, especialmente en la latencia generada por los tiempos de envío y recepción de los comandos. La principal falla que tiene el diseño original de la tarjeta RoboveroTM, se presenta en los retardos que genera el hecho de tener un único canal físico de comunicación, ya que toda la información desde y hacia la tarjeta debe hacerse por un único puerto USB (ver Figura 5.4), lo que genera un “cuello de botella” en las comunicaciones. Por esa razón, un esfuerzo importante se ha realizado en el mejoramiento de dicho firmware, soportado en la información aportada por el fabricante, así como con la colaboración de diferentes investigadores y desarrolladores que trabajan con la tarjeta RoboveroTM. Los resultados de estas modificaciones han sido incluidas en la página de desarrollo de la tarjeta ¹, donde en la actualidad se participa activamente en la lista de correos en el continuo mejoramiento del firmware. Además, el firmware desarrollado está almacenado y es de dominio público en la página del grupo investigador ². A continuación se detallan los aspectos más importantes que han implicado la extensión y mejora del firmware.

¹<http://robovero.org/lab/projects/rospHERE/>

²<http://www.robciB.etsii.upm.es/redmine/projects/roboticsphere/repository>

5.2.1.1. Generalidades del firmware

El funcionamiento del firmware se basa en un complejo conjunto de instrucciones, el cual define una equivalencia de los comandos básicos del procesador, como lectura de registros, puertos, temporizadores, interrupciones, etc. De esta manera, una instrucción de lectura de un registro, se traduce en un mensaje que incluye cabecera, cuerpo y fin de mensaje, lo que implica que algunas rutinas básicas, como la recepción de datos de un GPS, lectura de una IMU, etc., se traduzcan en extensos mensajes que deben ser enviados y recibidos por un sistema externo (ordenador o sistema de cómputo embebido, como el Overo Fire[®]). Además, considerando los diferentes sensores y actuadores del robot, el tráfico de comunicaciones y extensión de mensajes resultan en retardos que dificultan el control del sistema.

5.2.1.2. Extensiones realizadas sobre el firmware

Para que la tarjeta Robovero[™] pudiese ser utilizada como tarjeta madre del robot ROSPHERE, se ha invertido un importante esfuerzo en mejorar el firmware. Para esto, se ha rediseñado la metodología mencionada, incluyendo en el firmware instrucciones que agrupan varios comandos. Un ejemplo de esto ha sido la lectura de la IMU (9 GdL), donde se tienen 2 registros para cada uno de los GdL, esto implica un total de 18 registros por leer. En una versión original del firmware proporcionado por el fabricante ¹, se debían realizar 18 comandos de comunicación, lo que incluía un mensaje de solicitud y uno de respuesta, en total 36 mensajes vía USB, lo que para un sistema de cómputo embebido como el utilizado (Overo Fire[®]) tomaba un promedio de 1,15s. Una extensión o mejora desarrollada en este proyecto, define una nueva instrucción con la cual se le indica al procesador de bajo nivel que reúna toda la información de la IMU, formando un solo paquete. Con esta nueva instrucción y utilizando el sistema Overo Fire[®], se puede obtener la información completa de la IMU en 0,016s, reduciendo considerablemente la respuesta del sistema.

Otras mejoras hechas sobre el firmware han incluido el uso de interrupciones del procesador de bajo nivel. Este tipo de instrucciones se han desarrollado para recibir la información de elementos como el GPS y módulos inalámbricos Xbee. Mediante las nuevas instrucciones se solicita la información, la cual es actualizada periódicamente en

¹<http://robovero.org/>

5. ROSPHERE: ARQUITECTURAS HARDWARE Y SOFTWARE

un buffer. En resumen, la capa de bajo nivel de software se concentra en el firmware del procesador de la tarjeta RoboveroTM, el cual ha sido extendido mediante la implementación de funciones de bajo nivel específicas para realizar la lectura o escritura de periféricos, con el fin de minimizar la cantidad de mensajes entre las capas baja y alta de la arquitectura. Estas funciones han potenciado el uso del procesador de bajo nivel, utilizando recursos como interrupciones, temporizadores, etc.

5.2.1.3. Partes necesarias para la expansión del firmware

En el Anexo C se incluyen, a manera de ejemplo, los códigos fuente de la función de lectura de la IMU. De manera general, incluir nuevas extensiones para el firmware implica desarrollar ciertas funciones y seguir algunos pasos, de manera que exista una correcta comunicación entre las capas de alto y bajo nivel de software. Básicamente se divide en las funciones que deben ser programadas en el microcontrolador de bajo nivel y aquellas que deben ejecutarse desde el ordenador de alto nivel.

Respecto a las que se deben incluir en la memoria del microcontrolador de bajo nivel, se codifica nueva función que debe ser escrita en el lenguaje del microcontrolador, en este caso en lenguaje de programación C¹. En el Código C.1 se presenta la función en C de bajo nivel de lectura de la IMU. Esta sintetiza en una sola función la lectura de todos los registros relacionados con los acelerómetros, magnetómetros y giróscopos. Otras funciones de bajo nivel pueden incluir interrupciones, como es el caso de la lectura del GPS. Además, esta nueva función se debe incluir en una tabla de funciones (wrappers), como se aprecia en el Código C.2, de manera que si el microcontrolador de bajo nivel recibe desde el ordenador de alto nivel la instrucción, el micro sepa qué función debe ejecutar.

Finalmente, en el ordenador que realiza el procesamiento de alto nivel, donde se encuentran las funciones de envoltorios (del inglés *wrapper*) del firmware, debe incluirse una función que envíe a través del puerto USB un mensaje con la función a ejecutar en el microcontrolador de bajo nivel. Dicho mensaje debe ser especificado tal como se definió en la tabla en bajo nivel (ver Código C.2). Un ejemplo de una función de alto nivel codificado en lenguaje de programación Python se muestra en el Código C.3.

¹<http://code.google.com/p/32bitmicro/wiki/LPC1700CMSIS>

5.2.2. Procesamiento de alto nivel

El procesamiento en este nivel se desarrolla sobre la capa alta de la arquitectura hardware, es decir, sobre el sistema de cómputo embebido Overo Fire[®], el cual cuenta con un sistema operativo Linux. La función principal en esta capa es obtener información sensorial del robot y procesarla, así como la implementación de los algoritmos de control, bien sea por medio de comandos enviados por un operador remotamente o mediante un planificador de trayectorias/misiones. Para esto ha sido necesario el desarrollo de rutinas que combinan diferentes recursos que van desde el sistema operativo utilizado, pasando por los lenguajes y paradigmas de programación, hasta el uso de recursos de visualización para la operación remota.

5.2.2.1. Sistemas operativos Linux y la evaluación del uso del Sistema Operativo de Robots (ROS)

Los sistemas de cómputo embebido tipo Overo cuentan con una memoria NAND, que tiene un sistema operativo Linux preinstalado. La distribución por defecto es Linux Ångström y generalmente cuenta con los controladores de hardware necesarios para el sistema embebido específico, que en el caso particular de ROSPHERE es el Overo Fire[®]. Para este caso son necesarios controladores de la tarjeta de comunicación inalámbrica WiFi, la del dispositivo de Bluetooth, etc.

En una primera etapa de pruebas del sistema de cómputo, se ha utilizado el sistema operativo original (*i.e.*, Linux Ångström), con el objetivo de evaluar las capacidades de comunicación, así como la comunicación con la tarjeta Robovero[™]. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios y el uso del firmware de alto nivel para controlar la tarjeta principal desde el sistema Overo Fire[®] ha sido validado.

Realizada una primera etapa de validación, se ha procedido a la instalación de una distribución diferente de Linux, específicamente la Ubuntu 11.04. La distribución Ubuntu ha sido seleccionada ya que facilita la instalación del sistema operativo para robots (ROS), el cual permite una integración y uso rápido de dispositivos como sensores y actuadores, así como la aplicación de algoritmos de control y procesamiento de información.

En la actualidad ROSPHERE cuenta con los sistemas operativos Ubuntu+ROS, pero hasta el momento no se han utilizado los servicios de ROS, ya que para esto

5. ROSPHERE: ARQUITECTURAS HARDWARE Y SOFTWARE

se requiere un esfuerzo adicional en la compilación de los controladores. La mayor dificultad radica en que el sistema Overo Fire[®] no cuenta con una arquitectura estándar, sobre la cual muchos de los módulos de ROS aún se encuentran en desarrollo. No obstante, esto no descarta su uso y pruebas sobre este tipo de sistemas que resulta ser compatible con otros disponibles comercialmente.

5.2.2.2. Lenguajes y paradigmas de programación

Como se ha mencionado previamente, el procesamiento de bajo nivel se hace por medio de un firmware encargado de controlar los periféricos conectados a la tarjeta principal. También se ha descrito que dichas instrucciones podrían ser enviadas vía USB desde un ordenador externo o uno embebido. ROSPHERE utiliza la opción de un ordenador embebido, y para ello cuenta con una versión equivalente del firmware en alto nivel, la cual tiene el mismo conjunto instrucciones, con la diferencia que han sido “encapsuladas” (del término *wrap* o *wrapper*, del inglés) en un lenguaje de programación de alto nivel y orientado a objetos, llamado Python.

Python es un lenguaje de programación escrito y desarrollado en C, pero con características de un lenguaje interpretado, de alto nivel y orientado a objetos. Su gran ventaja respecto a otros lenguajes de alto nivel es la facilidad de desarrollar módulos de extensión en C, lo que permite combinar la rapidez de prototipado de los lenguajes interpretados y de alto nivel, pero sin perder la eficiencia temporal de los lenguajes compilados.

5.2.2.3. Interfaz de teleoperación

ROSPHERE cuenta con una interfaz gráfica para su teleoperación, la cual ha sido desarrollada en Python y utiliza los “wrappers” del firmware mencionados en la sección anterior. Esta interfaz permite controlar los movimientos sencillos de robot, como serían la marcha hacia delante y hacia atrás, así como los giros. Además, la interfaz permite visualizar el estado de los diferentes sensores del robot, los cuales fueron mencionados al inicio de esta sección (ver Figura 5.5).

5.2.3. Interconexión

Finalmente, se puede sintetizar la arquitectura software de ROSPHERE, como dos capas de procesamiento de datos. La primera de ellas, denominada de bajo nivel,

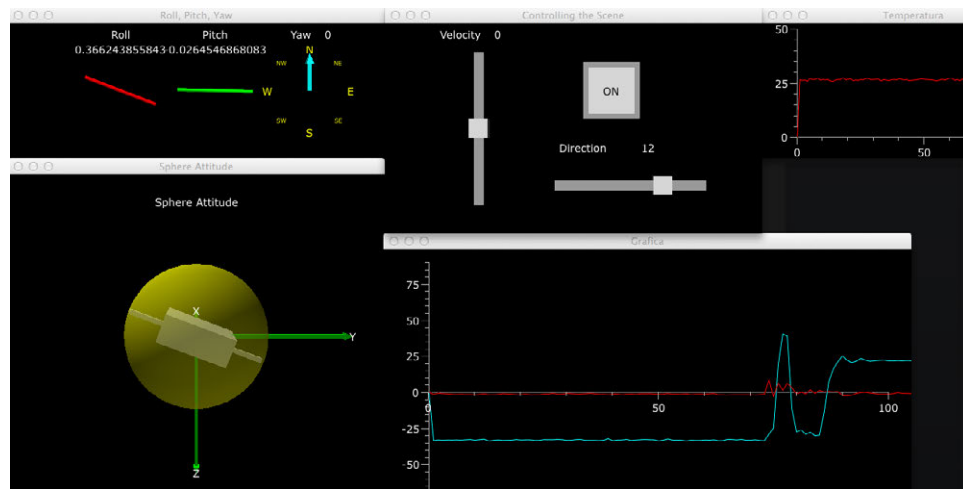


Figura 5.5: Interfaz gráfica de la estación remota de ROSPHERE. Esta interfaz es utilizada para operar el robot cuando éste se encuentra en modo de teleoperación. La interfaz permite controlar cada uno de los GdL del robot, así como visualizar los valores y estado de los sensores, incluyendo la IMU (Roll, Pitch, Yaw), temperatura y humedad relativa.

contiene los protocolos de comunicación con los diferentes periféricos del robot, mientras que la denominada de alto nivel es la encargada de controlarlo, ya sea por comandos de operación de un operador o por una misión predefinida. Estas dos capas se comunican por medio de un conjunto de instrucciones, denominado firmware que existe en ambos nivel de programación. Esta síntesis se puede apreciar en la Figura 5.6.

5. ROSPHERE: ARQUITECTURAS HARDWARE Y SOFTWARE

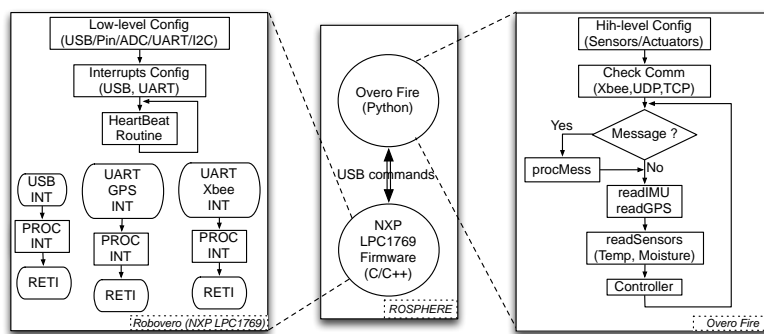


Figura 5.6: Arquitectura software de ROSPHERE. Está separada en la capa de cómputo de bajo y alto nivel, las cuales se relacionan de manera directa con la arquitectura hardware. La comunicación entre ambas capas se realiza mediante mensajes que son enviados por comunicación (USB).

6

Pruebas y resultados

ROSPHERE (*“RObotic SPHERE”*), el prototipo desarrollado en esta investigación, se presenta como una plataforma móvil con un sistema de tracción no convencional, con el cual se pueden desarrollar tareas de monitorización e inspección. Este capítulo presenta el conjunto de pruebas y resultados obtenidos, que permiten validar diferentes características del robot. Éstas se dividen en 4 grupos dispuestos de la siguiente manera. En primer lugar, se ha evaluado a la capacidad de movimiento del robot y la adquisición de información sensorial, con lo cual se ha validado las arquitecturas hardware y software expuestas en el Capítulo 5. Un segundo conjunto de pruebas ha permitido demostrar la capacidad de interacción segura del robot con las personas. Por otra parte, un tercer grupo ha demostrado la versatilidad del robot, en cuanto al movimiento en diferentes tipos de terrenos se refiere. Por último, y como una combinación de las características anteriores, se presenta el robot utilizado en la medición de variables ambientales en diferentes escenarios.

6.1. Conjunto de pruebas 1: Validación de movimientos y adquisición sensorial.

El primer grupo de pruebas ha sido definido para validar una de las aplicaciones propuesta para ROSPHERE: el proceso de adquisición de datos de los sensores y, en consecuencia, la capacidad del robot para actuar como un sensor móvil. Estas pruebas han permitido determinar los rangos de medición, incluyendo no solo los máximos y mínimos de los sensores, sino también las tasas reales de adquisición de datos. Además,

6. PRUEBAS Y RESULTADOS

como complemento a la información sensorial obtenida, ROSPHERE cuenta con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), mediante el cual las mediciones realizadas por el robot han sido geo-referenciadas.

Estas primeras pruebas se han realizado en las instalaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII), de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) (ver Figura 6.1a), donde el robot realiza desplazamientos básicos para evaluar sus capacidades de movimiento. El objetivo de estas primeras pruebas incluye la verificación de la capacidad de realizar movimientos no-holonómicos del robot, al tiempo que registra de información sensorial, en este caso temperatura.

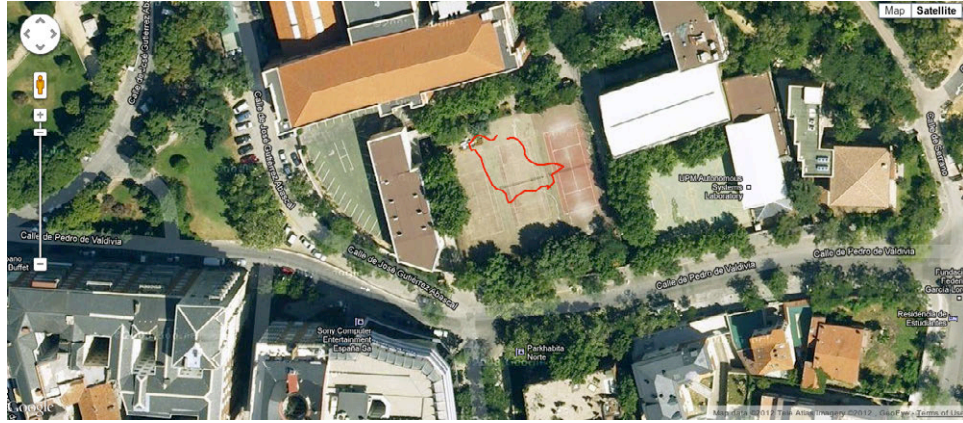
Las Figuras 6.1b y 6.1c muestran el registro de la temperatura del robot, donde es posible apreciar que en determinadas áreas, especialmente en la zona superior derecha, la temperatura es mayor que la media de las mediciones. Esto se debe a que el recorrido ha incluido una zona donde el robot se desplaza sin sombra y bajo la exposición directa al sol. La información presentada incluye la comparación entre los valores aportados por 2 sensores diferentes, uno analógico (LM35) y uno digital (SHT71).

Una de las dificultades encontradas en estas pruebas, que se presentan como propuestas de trabajos futuros en el Capítulo 7, se da por la diferencia de temperatura dada al interior de la esfera y la temperatura ambiental exterior a la misma. En estas pruebas se ha concluido que existe una diferencia constante de 11 °C con el sensor LM35 y de 9 °C con el sensor SHT71. Esta diferencia se genera por el calentamiento de los motores que se encuentran en el interior de la esfera. Además, se ha concluido que este error se considera constante después de que la dinámica de la temperatura alcanza su estado estacionario (alrededor de 150s después de la puesta en marcha del robot).

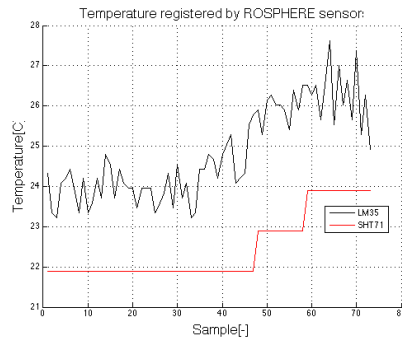
6.2. Conjunto de pruebas 2: Interacción segura con personas.

Este grupo de pruebas ha sido diseñado para verificar la capacidad del robot de interactuar de manera segura con personas. Para esto, se ha puesto en marcha en un entorno con un número considerable de elementos dinámicos, en el cual existe el riesgo de colisiones no solo con personas, sino también con maquinaria y otros vehículos. Uno de los escenarios de prueba ha sido el Parque del Retiro, en Madrid, España, donde se encuentran elementos móviles (*e.g.*, personas, bicicletas, coches, etc.). El objetivo

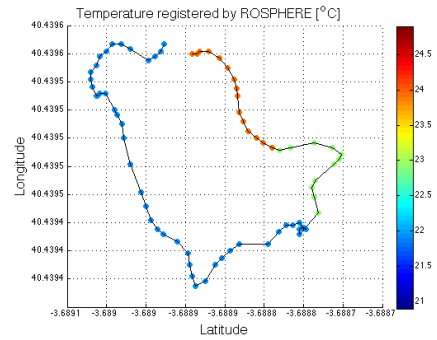
6.2 Conjunto de pruebas 2: Interacción segura con personas.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.1: Conjunto de pruebas 1: Adquisición de datos en el campus de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII), en la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). En (a) se presenta el resultado de una de las diferentes pruebas en la instalaciones de la ETSII, realizadas para verificar la precisión en medición y capacidades de movimiento del robot. En (b) se presenta la comparación entre la información de temperatura adquirida por 2 sensores diferentes del robot ($^{\circ}\text{C}$). En (c) se muestra un mapa de colores que representa los diferentes valores de temperatura registrados durante el recorrido del robot ($^{\circ}\text{C}$).

6. PRUEBAS Y RESULTADOS

principal ha sido verificar la capacidad de movimiento del robot, en modalidad de teleoperación, y de evaluar el impacto en el entorno de operación. La interacción segura se ha validado ya que el robot ha estado bajo perturbaciones externas, como niños tratando de manipularlo, así como colisiones con elementos estáticos como paredes y árboles. En la Figura 6.2 se puede apreciar ROSPHERE v0.2 durante algunas de estas pruebas.



Figura 6.2: Conjunto de pruebas 2: Interacción segura con personas. ROSPHERE en contacto con una niña durante el registro de variables ambientales en el parque *El Retiro* en Madrid, España.

6.3. Conjunto de pruebas 3: Versatilidad y adaptabilidad a diferentes terrenos.

Una de las principales características de las esferas robóticas es su sistema de tracción poco convencional, ya que éste presenta una alternativa versátil para desplazamientos en diferentes tipos de terrenos. Este grupo de pruebas se ha centrado en validar el uso de la esfera robótica, como un vehículo terrestre capaz de desempeñar tareas en diferentes terrenos. Algunos de los escenarios han incluido arena de playa, césped, tierra y superficies rígidas y compactas como el asfalto (ver Figura 6.3).

Los resultados de estas pruebas han demostrado la capacidad de la esfera robótica para desplazarse sobre las superficies mencionadas. Es importante destacar que el robot es capaz de cambiar de superficie durante el desempeño de una tarea, sin que esto

6.4 Conjunto de pruebas 4: Desempeño global en tareas de monitorización de variables ambientales.

implique alguna modificación de la estructura del robot o la suspensión de la tarea en ejecución. No obstante, los cambios de tipos de terreno implican la variación de la velocidad máxima de desplazamiento, que se debe al aumento de la superficie de contacto y en consecuencia a la fricción, como se ha explicado en el Capítulo 4.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.3: Conjunto de pruebas 3: Desplazamiento y desempeño de ROSPHERE en diferentes superficies. (a) Arena de playa (Valencia, España). (b) Césped (Parque el Retiro, Madrid, España). (c) Tierra de cultivos. (d) Asfalto.

6.4. Conjunto de pruebas 4: Desempeño global en tareas de monitorización de variables ambientales.

Este último grupo de pruebas ha sido definido con el objetivo de validar el uso de ROSPHERE como una plataforma móvil con capacidades de monitorización de

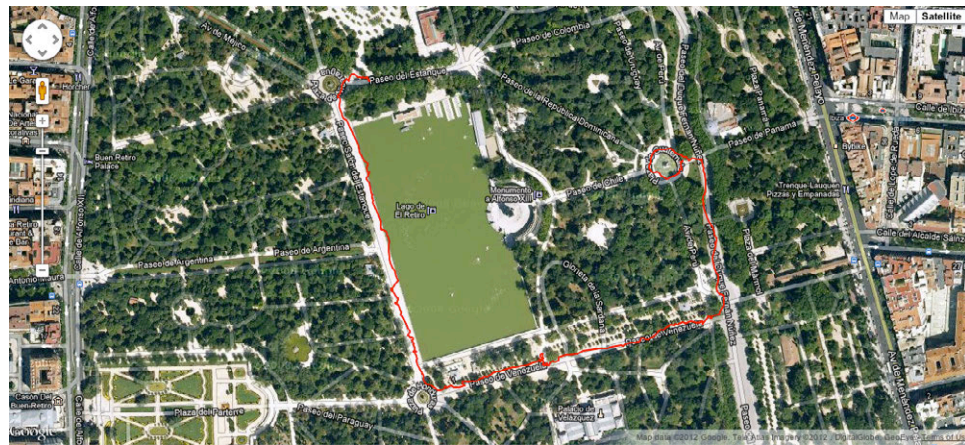
6. PRUEBAS Y RESULTADOS

variables ambientales, *i.e.*, como un sensor móvil. Para esto, el robot ha sido puesto en funcionamiento en diferentes escenarios, donde se puedan verificar las diferentes características mencionadas a lo largo de este documento.

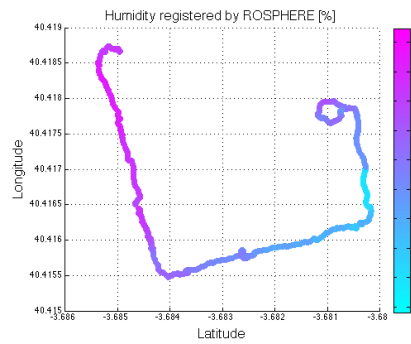
Un primer escenario ya mencionado ha sido el Parque del Retiro. En éste, ROSPHERE ha sido utilizado para registrar variables ambientales por parte del robot, específicamente temperatura y humedad, durante el recorrido realizado. Al mismo tiempo, esta prueba ha permitido validar la información sensorial adquirida, ya que se puede apreciar claramente cómo la humedad aumenta cuando el robot se aproxima a áreas donde el agua está presente, como lo es el lago y las fuentes del parque. Los valores de temperatura, a su vez, se ven alterados en lugares donde el robot no contaba con sombra de árboles y estaba expuesto al contacto directo con la luz del sol. Estos resultados se pueden apreciar claramente en la Figura 6.4.

El segundo escenario de pruebas ha sido las instalaciones del Centro de Automática y Robótica, UPM-CSIC, en Arganda, Madrid. En este lugar, se ha teleoperado el robot, con el objetivo de realizar un recorrido perimetral (ver Figura 6.5), con el cual se pretende simular la monitorización de edificaciones presentes en Grandes Infraestructuras de Exteriores (GIE). Con estas pruebas se busca evaluar la utilidad de una esfera robótica en el contexto de Sistemas Multi-Robot (SMR), para la vigilancia e inspección de las GIE. Es importante recordar que este es uno de los marcos de desarrollo de esta investigación, como se ha mencionado en el Capítulo 1.

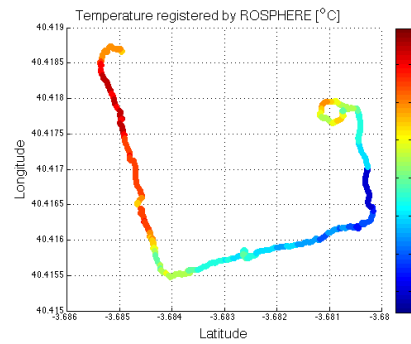
6.4 Conjunto de pruebas 4: Desempeño global en tareas de monitorización de variables ambientales.



(a)



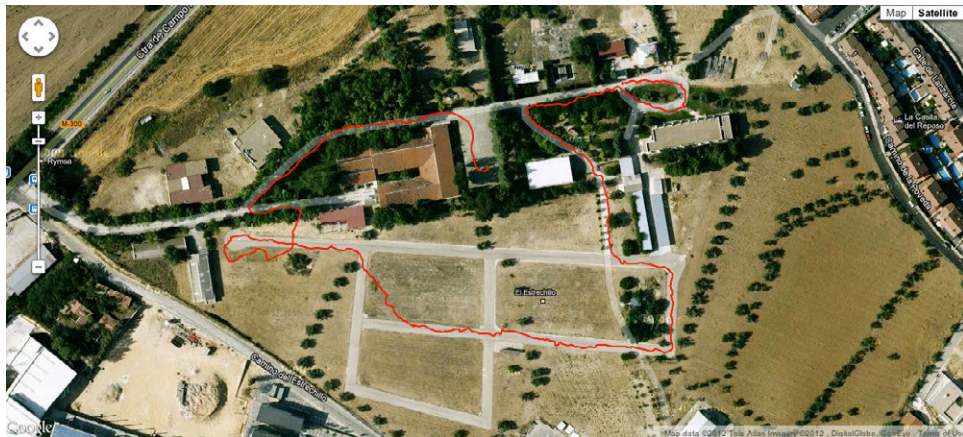
(b)



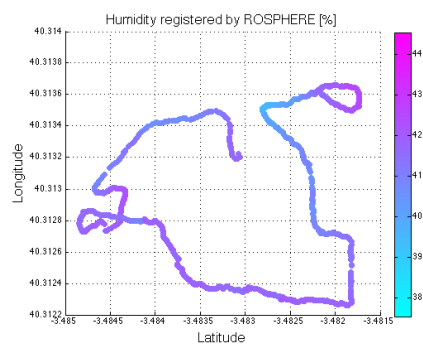
(c)

Figura 6.4: Conjunto de pruebas 4: Registro de variables ambientales en el parque *El Retiro* en un entorno con elementos móviles. En (b) se presenta el comportamiento de la humedad a lo largo del recorrido realizado (%). En (c) se presenta la temperatura registrada en el mismo recorrido (°C).

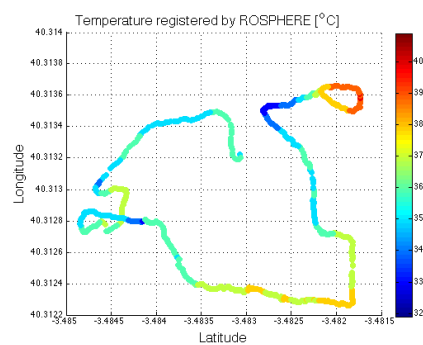
6. PRUEBAS Y RESULTADOS



(a)



(b)



(c)

Figura 6.5: Conjunto de pruebas 4: Desempeño de tareas de monitorización perimetral. Se muestra el recorrido de ROSPHERE realizando el registro de variables ambientales en las instalaciones del Centro de Automática y Robótica (CAR, UPM-CSIC), en Arganda, Madrid. Este se considera como un escenario similar al de Grande Infraestructuras Exteriores (GIE).

Conclusiones y trabajos futuros

El desarrollo de este proyecto ha incluido diferentes etapas que van desde la revisión del estado del arte, pasando por el modelado, simulación, diseño y construcción de prototipos, hasta llegar a las pruebas finales y aplicaciones potenciales en donde el robot puede ser de utilidad. Como resultado de este proceso, se han definido diferentes aspectos que incluyen las restricciones en las capacidades de operación del robot, así como las posibles extensiones que permiten ampliar sus prestaciones. Este capítulo final sintetiza los aspectos más relevantes a concluir sobre el uso de las esferas robóticas, así como propuestas de trabajos futuros, algunas de las cuales se encuentran en evaluación y en desarrollo.

7.1. Conclusiones

ROSPHERE ha validado el uso de las esferas robóticas como un sistema móvil de tracción no convencional, el cual puede ser utilizado en diferentes terrenos. El principio básico de inducción de movimiento ha demostrado ser útil para que este tipo de vehículos pueda desempeñarse sobre diferentes superficies, desde materiales de alta compactación como asfalto y concreto, hasta materiales de media o baja compactación como arena de playa y tierra de cultivos. Esto se debe principalmente a la manera en que se aplica la fuerza que genera el movimiento, ya que a diferencia de un robot móvil convencional con ruedas, sobre las cuales se sostiene la estructura del robot y donde se ubican los motores que hacen girar dichas ruedas, las esferas robóticas cuentan con un único cuerpo esférico que es la estructura en sí del robot, dentro del cual se ubica un

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

mecanismo que no realiza una tracción directa sobre la superficie, sino que genera un desbalance de la masa del sistema, que en consecuencia induce movimiento.

Con lo anterior, ROSPHERE ha demostrado ser un robot móvil versátil, el cual puede cambiar de terrenos durante el desarrollo de una tarea, sin necesidad de la interrupción de la misma o la modificación de su sistema de tracción, a diferencia de otros tipos de robots móviles que pueden requerir adaptaciones para desempeñarse en diferentes terrenos.

Por otra parte, ROSPHERE ha probado ser una plataforma móvil robusta, sin que esto implique que sea un vehículo de interacción fuerte con su entorno. La robustez de estos sistemas proviene principalmente de su forma regular esférica, lo que hace que el vehículo tenga una alta capacidad de recuperación a perturbaciones, que pueden incluir colisiones con objetos estáticos y móviles en su entorno de trabajo. Sin importar la dirección de la colisión que afecte a este tipo de esferas robóticas, éstas siempre tienden a entrar en una configuración de fácil recuperación.

Además, la alternativa de masa pendular con eje fijo ha demostrado ser idónea para el tipo de aplicaciones probadas, en especial tareas de monitorización de diferentes tipos de variables. Esta alternativa mecánica ha permitido la maniobrabilidad de la esfera robótica en modo de teleoperación y cuenta con una Unidad Interna de Locomoción (o Control), donde se han ubicado algunos sensores. Por lo tanto, y considerando las características previamente mencionadas, las esferas robóticas representan una alternativa de sensor móvil robusto aplicable en entornos no estructurados.

Finalmente, la interacción de ROSPHERE ha demostrado ser segura con su entorno, incluyendo los elementos estáticos y dinámicos que en éste se encuentren. Pruebas realizadas en espacios concurridos por personas han demostrado que el robot puede desempeñarse de manera segura, ya que las posibles colisiones no afectan la seguridad e integridad ni del sistema, ni de las personas.

7.2. Trabajos Futuros

Las pruebas realizadas hasta el momento sobre ROSPHERE han permitido evaluar el potencial de este tipo de robots, validando sus capacidades y demostrando sus limitaciones. Por lo tanto, el resultado de esta investigación se considera como un punto

de partida a investigaciones y desarrollos en los que se mejoren diferentes aspectos del robot.

Desde el punto de vista mecánico, es importante destacar que las limitaciones del robot para superar obstáculos depende de sus tamaños, ya que existe una relación entre el tamaño máximo de un obstáculo que se pueda superar y el tamaño del robot. Esta ha sido una de las limitaciones importantes al momento de realizar pruebas sobre terrenos como tierra de cultivos, donde el tamaño de los terrones resultado del arado de la tierra, exceden dicha relación. Para estas tareas, donde se han realizado pruebas preliminares, se ha concluido que el aumento del diámetro del robot a un tamaño de 50 a 60 *cm* de diámetro, resultaría idóneo para este tipo de labores. Esto, en consecuencia, implicaría el uso de diferentes actuadores que puedan soportar el tipo de masa pendular, que debería aumentarse en proporción a la nueva inercia de cuerpo de mayor tamaño. En la actualidad se está realizando los estudios necesarios, para definir los requerimientos que un vehículo de este tipo implicaría, y así evaluar su viabilidad.

Desde una perspectiva sensorial del sistema, considerando los resultados obtenidos al momento de realizar las pruebas de monitorización de diferentes variables, especialmente las ambientales, se ha determinado la necesidad de realizar las mediciones fuera del robot, ya que al interior del cuerpo esférico, donde hasta el momento se han ubicado los sensores, las mediciones son distorsionadas considerablemente por efectos de calentamiento de los equipos electrónicos (procesadores y baterías) y de actuación (servomotores). Además, en la actualidad se está evaluando la posibilidad de uso de sensores adicionales que incluyan mediciones de gases, los cuales puedan ser utilizados para tareas de monitorización de cultivos, así como inspección perimetral de instalaciones con gasoductos. Por otra parte, el mecanismo interno de masa pendular de eje fijo cuenta con una característica importante, ya que los extremos del eje principal pueden ser puntos de referencia para la ubicación de sensores exteroceptivos (*e.g.*, temperatura, humedad, luminosidad, gases, visión, etc.)

Respecto a las mediciones propioceptivas del robot, es importante mencionar que la información adquirida por los sensores de actitud (IMU y GPS), adicionando sensores de velocidad de rotación del cuerpo central del robot, pueden ser procesados con diferentes algoritmos, lo que permitiría determinar el comportamiento real del sistema durante el desempeño de diferentes tareas. Esta información puede ser utilizada para desarrollar algoritmos de control que contribuyan con la estabilización del sistema en modo de

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

teleoperación, o incluso en el desarrollo de controladores que permitan la navegación autónoma del robot. Para lo anterior, la versión actual de ROSPHERE cuenta con los elementos de procesamiento capaces de computar dichos algoritmos de estimaciones y correcciones.

Finalmente, los posibles desarrollos previamente mencionados generan una cantidad importante de áreas de estudio e investigación. Esto incluye la planificación de trayectorias de sistemas no-holonómicos, como las esferas robóticas, considerando sus restricciones cinemáticas y dinámicas. Esta planificación puede ser un desarrollo inicial para alcanzar la navegación autónoma de este tipo de sistemas. Otra posible área de investigación sería la detección de obstáculos estáticos y dinámicos mediante elementos de visión (cámaras), información que podría ser entrada del planificador de trayectorias del robot.

Anexo A

Cálculo de los parámetros de masa

Los parámetros de masa (*i.e.*, momentos de inercia y vectores al centro de masa) de los cuerpos rígidos que han sido utilizados en el primer modelo de simulación, fueron definidos a partir de sólidos como cilindros, prismas rectangulares y esferas huecas. En todos los casos se han asumido cuerpos hechos de materiales de masa uniformemente distribuida. En este anexo se presentan algunas ecuaciones básicas para calcular los momentos de inercia y vectores al centro de masa de dichos cuerpos.

A.1. Momentos de inercia

El momento de inercia es una cantidad que permite cuantificar la inercia rotacional de un cuerpo, que está dada como una magnitud escalar expresada para cada posible eje de rotación de un cuerpo. De manera general, el momento de inercia refleja la distribución de la masa de un cuerpo respecto a un eje de rotación (54). Además, es posible definir el denominado tensor de inercia, el cual reúne en una matriz los diferentes momentos de inercia relativos a cada posible eje de rotación. La ecuación general que permite calcular el momento de inercia de un cuerpo está dada de la siguiente forma:

$$I = \int_m x^2 \cdot dm = \int_v \rho r^2 \cdot dV \quad (\text{A.1})$$

donde en la primera ecuación, x es la distancia a la partícula de masa respecto al eje de rotación, dm es el diferencial de masa del cuerpo. Mientras que en la segunda

A. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE MASA

parte de la ecuación se calcula por medio de una integral de volumen, ρ es la densidad del material, dV es el diferencial de volumen.

A.1.1. Momento de inercia de un cilindro

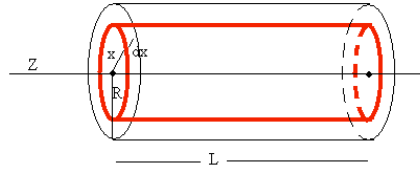


Figura A.1: Parámetros necesarios para el cálculo del tensor de inercia de un cilindro.

Los parámetros involucrados en el cálculo del tensor de inercia de un cilindro incluyen su masa (M), radio (R) y longitud (L). El cálculo se hace por medio de una integral de volumen, para ello se toman capas cilíndricas cuyo radio interior es x y el exterior es $x + dx$, con una longitud L , como se puede apreciar en la Figura A.1. Se define entonces la masa correspondiente a dicha capa cilíndrica y es igual a dm :

$$dm = \frac{M}{\pi R^2 L} 2\pi x dx \cdot L \quad (\text{A.2})$$

De donde se puede calcular el tensor de inercia del cilindro como:

$$I_c = \int x^2 dm = \int_0^R \frac{2M}{R^2} x^3 dx = \frac{1}{2} M R^2 \quad (\text{A.3})$$

A.1.2. Momento de inercia de un paralelepípedo

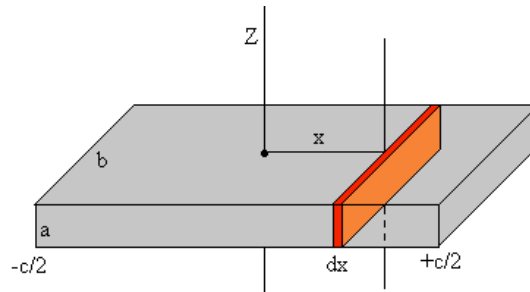


Figura A.2: Parámetros necesarios para el cálculo del tensor de inercia de un paralelepípedo.

En el caso de un paralelepípedo, como puede ser el caso de un prisma rectangular o un cubo, se tienen como parámetros la masa (M) y las distancias de cada uno de sus lados desde un eje perpendicular que pasa por una de sus caras (a, byc). Nuevamente se divide el cuerpo en pequeñas placas rectangulares con dimensiones ayb y de espesor dx . Finalmente el momento de inercia del paralelepípedo, específicamente para el caso mostrado en Figura A.2, está dado por la ecuación:

$$I_p = \int_{-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} \left(\frac{1}{12}b^2 + x^2 \right) \frac{M}{c} \cdot dx = \frac{M}{12} (b^2 + c^2) \quad (\text{A.4})$$

A.1.3. Momento de inercia de una esfera hueca

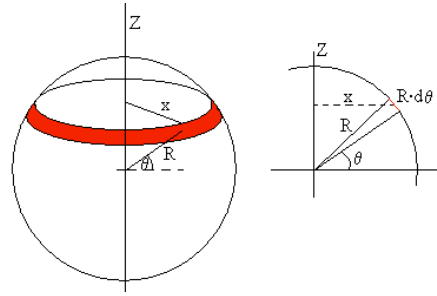


Figura A.3: Parámetros necesarios para el cálculo del tensor de inercia de una esfera hueca, como es el caso del cuerpo esférico del robot.

Para el caso de las esferas huecas, los parámetros a considerar para el cálculo de los momentos de inercia son la masa (M) y el radio de la esfera (R). SE toma como elemento diferencial de masa una sección rectangular de longitud $2\pi x$ y de ancho $R \cdot d\theta$, por lo tanto:

$$dm = \frac{M}{4\pi R^2} 2\pi x \cdot R \cdot d\theta \quad (\text{A.5})$$

Para finalmente calcular el momento de inercia como:

$$\begin{aligned} I_{eh} &= \int x^2 \frac{M}{4\pi R^2} 2\pi x \cdot R \cdot d\theta = \frac{M}{2R} \int x^3 d\theta = \frac{M}{2R} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} R^3 \cos^3 \theta \cdot d\theta \\ &= \frac{MR^2}{2} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (1 - \sin^2 \theta) \cos^2 \theta \cdot d\theta = \frac{MR^2}{2} \left(\sin \theta - \frac{1}{3} \sin^3 \theta \right) \Big|_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{3} MR^2 \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

A. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE MASA

A.2. Centro de masa

Para completar la descripción de los parámetros de masa de un sistema, adicional a los momentos de inercia ya explicados, es necesario estimar la posición del centro de masas (CM) del cuerpo. El CM se define como el punto geométrico sobre el cual se puede considerar que todas las fuerzas externas del sistema están aplicadas, o visto de otra forma, es el lugar donde se puede asumir que toda la masa de un cuerpo está concentrada (54). Considerando que los cuerpos utilizados en una primera estimación fueron sólidos de geometrías regulares y contruidos utilizando materiales uniformemente distribuidos, la posición de CM se puede asumir como coincidente con el Centro Geométrico (CG) del cuerpo. Sin embargo, cuando un cuerpo rígido está compuesto por diferentes sólidos, el CM final y resultante está dado de la siguiente manera:

$$\vec{r}_{cm} = \frac{\sum \vec{r}_i m_i}{m_{total}} \quad (\text{A.7})$$

donde la Ecuación A.7 indica que la distancia al CM respecto a un marco común de referencia, y es igual a la sumatoria del producto escalar de las masas y vectores distancia de cada cuerpo, todo dividido sobre la masa total de todos los cuerpos.

Anexo B

Operadores Espaciales

Roy Featherstone utiliza del álgebra espacial, una notación compacta 6-dimensional, para condensar la información de cantidades cinemáticas (velocidades y aceleraciones en sus componentes lineales y angulares), dinámicas (fuerzas traslacionales y rotacionales), así como parámetros físicos, como la inercia y masa de los cuerpos, y los operadores de transformación espacial necesarios (51). En la Ecuación B.1 se exponen las cantidades de velocidad espacial (V) y aceleración espacial (A), denominados vectores de movimiento, y fuerza espacial (F), vectores de fuerza.

$$V = \begin{pmatrix} w \\ v \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{v} \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} n \\ f \end{pmatrix}. \quad (\text{B.1})$$

Se define el operador de inercia espacial, que permite condensar los efectos del tensor de inercia y de la masa del cuerpo en un solo operador 6-dimensional, como se puede apreciar en la Ecuación B.2.

$$I_{i,cm} = \begin{bmatrix} J_{i,cm} & 0 \\ 0 & m_i \cdot U \end{bmatrix}. \quad (\text{B.2})$$

Finalmente, para las transformaciones espaciales, se definen los operadores de orientación (R) y traslación (P) como se muestran en las ecuaciones B.3 y B.4 respectivamente, donde $\tilde{p}_{i,i+1}$ representa la matriz skew simétrica que corresponde al operador del producto cruz de vectores. Estos operadores transforman las diferentes cantidades espaciales, nombradas previamente, de una sistema de referencia a otro.

$$\hat{R}_{i,i+1} = \begin{bmatrix} r_{i,i+1} & 0 \\ 0 & r_{i,i+1} \end{bmatrix}. \quad (\text{B.3})$$

B. OPERADORES ESPACIALES

$$\hat{P}_{i,i+1} = \begin{bmatrix} U & \tilde{p}_{i,i+1} \\ 0 & U \end{bmatrix}. \quad (\text{B.4})$$

$$\tilde{p}_{i,i+1} = \begin{bmatrix} 0 & -pz_{i,i+1} & py_{i,i+1} \\ pz_{i,i+1} & 0 & -px_{i,i+1} \\ -py_{i,i+1} & px_{i,i+1} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

Las relaciones espaciales que describen los links que conforman un sistema robótico involucran transformaciones en posición y orientación, la cuales deben ser condensadas en un único operador X , el cual permite propagar cantidades espaciales a lo largo de los cuerpos que conforman el sistema. Este operador se expone en la Ecuación B.6 y combina los operadores presentados previamente en las ecuaciones B.3 y B.4.

$$\hat{X} = \hat{R}^T \cdot \hat{P}^T \quad (\text{B.6})$$

Estos operadores, que permiten expresar las transformaciones espaciales presentes en el sistema de cuerpos rígidos, pueden ser obtenidos de las transformaciones homogéneas de la siguiente manera. Sea $\hat{X}_{\lambda(i),i}$ el operador espacial que permite transformar las cantidades expresadas en vectores de movimiento, velocidades y aceleraciones espaciales, desde un sistema $O_{\lambda(i)}$, donde $\lambda(i)$ es el padre de i (recorrido DFS), a un sistema O_i .

$$\hat{X}_{\lambda(i),i} = \hat{R}_{i,\lambda(i)}^T \cdot \hat{P}_{\lambda(i),i}^T \quad (\text{B.7})$$

Donde, en base a las ecuaciones B.3 y B.4, se definen los correspondientes operadores de rotación y traslación.

$$\hat{R}_{i,\lambda(i)}^T = \begin{bmatrix} r_{i,\lambda(i)}^T & 0 \\ 0 & r_{i,\lambda(i)}^T \end{bmatrix} \quad (\text{B.8})$$

$$\hat{P}_{\lambda(i),i}^T = \begin{bmatrix} U & 0 \\ -\tilde{p}_{\lambda(i),i} & U \end{bmatrix} \quad (\text{B.9})$$

Finalmente, el operador espacial 6-dimensional está conformado por operadores 3-dimensionales que pueden ser obtenidos de la matriz de transformación homogénea que se ha mostrado en la Ecuación 4.1 y es expresado como se muestra en la Ecuación B.10.

$$\begin{aligned}
\hat{X}_{\lambda(i),i} &= \hat{R}_{i,\lambda(i)}^T \cdot \hat{P}_{\lambda(i),i}^T \\
&= \begin{bmatrix} r_{i,\lambda(i)}^T & 0 \\ 0 & r_{i,\lambda(i)}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U & 0 \\ -\tilde{p}_{\lambda(i),i} & U \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} r_{i,\lambda(i)}^T & 0 \\ -r_{i,\lambda(i)}^T \cdot \tilde{p}_{\lambda(i),i} & r_{i,\lambda(i)}^T \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{B.10}$$

B. OPERADORES ESPACIALES

Anexo C

Extensiones y modificaciones del firmware

```
1  int _readIMU(uint8_t* args)
2  {
3      uint8_t      receive_buffer[6];
4      I2C_M_SETUP_Type setup;
5      int16_t*     axis_data;
6      Status       result;
7      uint8_t      transmit_buffer;
8      uint8_t      axis_enable_bit;
9      unsigned int value[9];
10     int i;
11
12     //reading accelerometer
13
14     setup.sl_addr7bit      = ACCEL_I2C_SLAVE_ADDRESS;
15     setup.retransmissions_max = MAX_ST_I2C_RETRANSMISSIONS;
16
17     setup.tx_data    = &transmit_buffer;
18     setup.tx_length  = 1;
19     setup.rx_data    = receive_buffer;
20     setup.rx_length  = 6;
21
22     transmit_buffer = ACCEL_DATA_ADDRESS|ST_I2C_AUTOINCREMENT_ADDRESS;
23
24     result = I2C_MasterTransferData(LPC_I2C0, &setup, I2C_TRANSFER_POLLING
25                                     );
26     if(result == ERROR)
27         return 1;
```

C. EXTENSIONES Y MODIFICACIONES DEL FIRMWARE

```
27     axis_enable_bit = ACCEL_CTRL_REG_X_ENABLE;
29     axis_data       = (int16_t*)receive_buffer;

31     for(i=0;i<3;i++)
32     {
33         value[i] = (unsigned int)(*axis_data+ACCEL_VALUE_OFFSET);

35         axis_enable_bit <<= 1;
36         axis_data++;
37     }

39     //reading Magnetometer

41     setup.sl_addr7bit      = MAG_I2C_SLAVE_ADDRESS;

43

45     transmit_buffer = MAG_DATA_ADDRESS|ST_I2C_AUTOINCREMENT_ADDRESS;

47     result = I2C_MasterTransferData(LPC_I2C0, &setup, I2C_TRANSFER_POLLING
48         );
49     if(result == ERROR)
50         return 1;

51     value[3] = MagDataToUInt32(&receive_buffer[0]);
52     value[4] = MagDataToUInt32(&receive_buffer[2]);
53     value[5] = MagDataToUInt32(&receive_buffer[4]);

55     //reading Gyroscope

57     setup.sl_addr7bit      = GYRO_I2C_SLAVE_ADDRESS;

59     transmit_buffer = GYRO_DATA_ADDRESS|ST_I2C_AUTOINCREMENT_ADDRESS;

61     result = I2C_MasterTransferData(LPC_I2C0, &setup, I2C_TRANSFER_POLLING
62         );
63     if(result == ERROR)
64         return 1;

65     axis_enable_bit = GYRO_CTRL_REG_X_ENABLE;
66     axis_data       = (int16_t*)receive_buffer;

67     for(i=0;i<3;i++)
68     {
69         value[i+6] = (unsigned int)(*axis_data+GYRO_VALUE_OFFSET);
```

```

71     axis_enable_bit <=<= 1;
       axis_data++;
73 }

75 sprintf((char*)str, "%x %x %x %x %x %x %x %x %x\r\n", value[0], value
    [1], value[2], value[3], value[4], value[5], value[6], value[7], value
    [8]);
       writeUSBOutString(str);
77
       return 0;
79 }

```

Listing C.1: Código C de bajo nivel para la lectura de la IMU. Esta función le indica al procesador de bajo nivel que debe enviar un solo paquete con toda la información de la IMU (*i.e.*, acelerómetros, giróscopos y magnetómetros).

```

1 #include "table.h"

3 /*
   * lookup table containing function names and corresponding wrapper
   * functions
5  * only accessed by usbuser
   */
7 const _nxp_function driver_table[] = {
    {NULL, NULL},
9    // ...
    {(uint8_t *) "deref", _deref},
11   {(uint8_t *) "roboveroConfig", _roboveroConfig},
    {(uint8_t *) "resetConfig", _resetConfig},
13
    {(uint8_t *) "readIMU", _readIMU},
15
    {(uint8_t *) "PWM_DeInit", _PWM_DeInit},
17   {(uint8_t *) "IRQn_Type_malloc", _IRQn_Type_malloc},
    {(uint8_t *) "NVIC_EnableIRQ", _NVIC_EnableIRQ},
19   {(uint8_t *) "NVIC_ClearPendingIRQ", _NVIC_ClearPendingIRQ},
21 };

23 int driver_table_len = sizeof(driver_table)/sizeof(_nxp_function);

```

Listing C.2: Todas las funciones que hacen parte del firmware deben estar definidas en una tabla donde se especifique la forma en la que la función llegará desde ordenador de alto nivel (wrapper).

C. EXTENSIONES Y MODIFICACIONES DEL FIRMWARE

```
1 def readIMU() :  
3     return robocaller("readIMU", "uint32_t")
```

Listing C.3: Función de alto nivel de lectura de la IMU. Esta función llama la rutina robocaller que se encarga de envolver (wrap) la función en un mensaje que será interpretado por el procesador de bajo nivel.

Anexo D

Planos de piezas de plástico de los prototipos

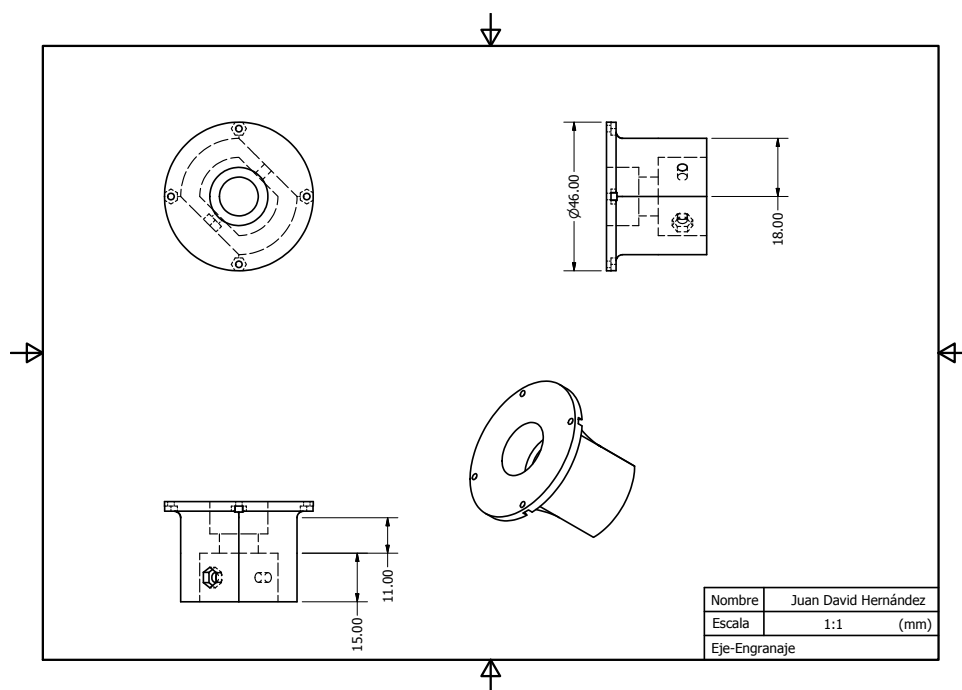


Figura D.1: Sujeción Eje-Engranaje ROSPHERE v0.1. Pieza que permite sujetar uno de los engranajes al eje principal del robot.

D. PLANOS DE PIEZAS DE PLÁSTICO DE LOS PROTOTIPOS

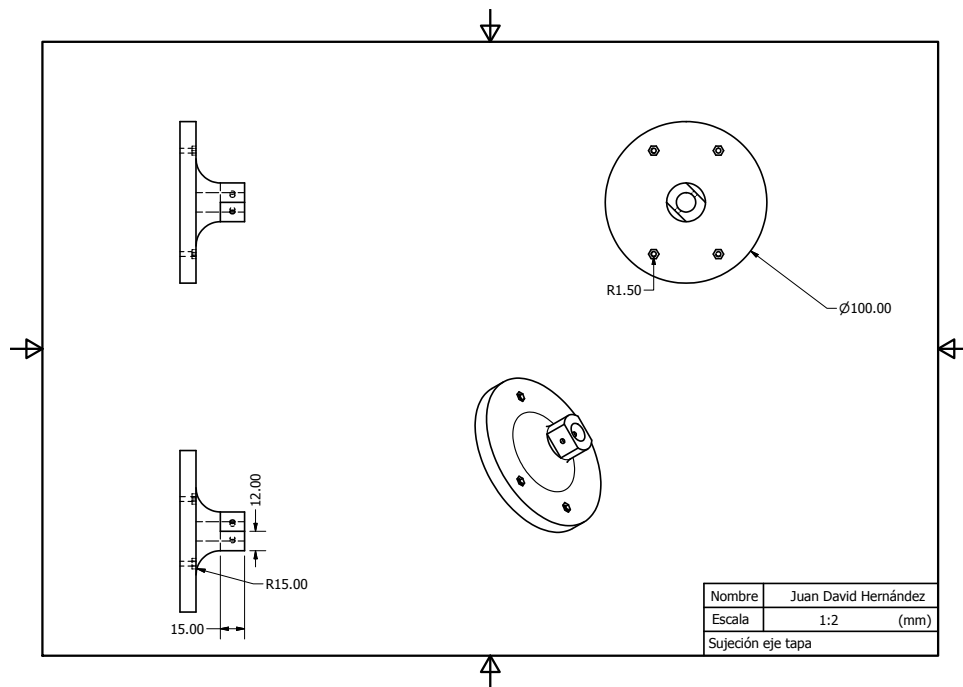


Figura D.2: Sujeción Eje-Esfera ROSPHERE v0.1. Pieza que permite sujetar cada extremo del eje principal al cuerpo esférico.

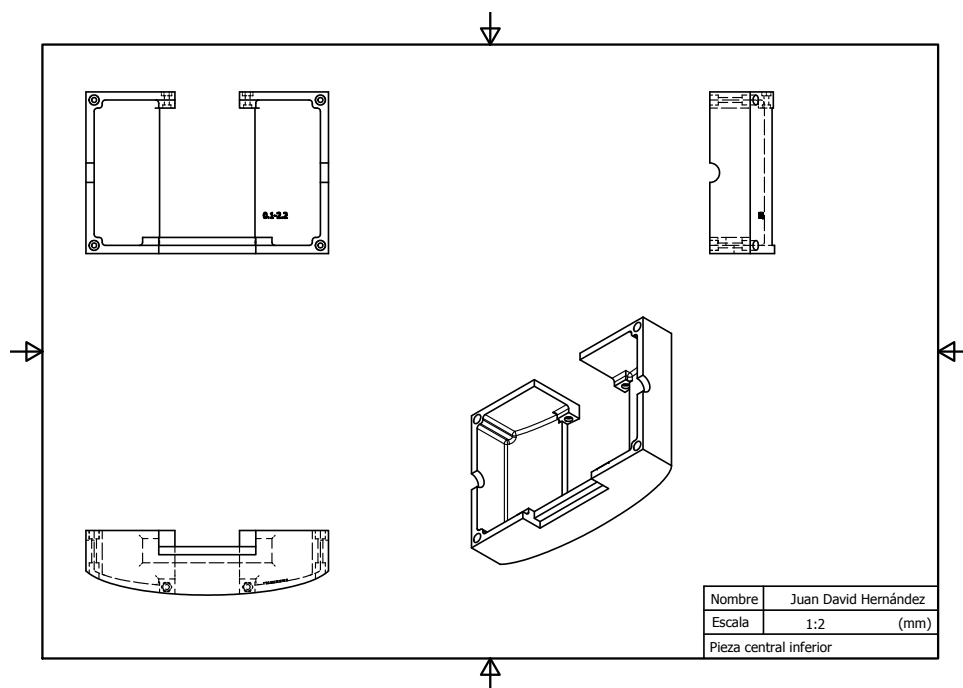


Figura D.3: Parte inferior de la pieza central de ROSPHERE v0.1.

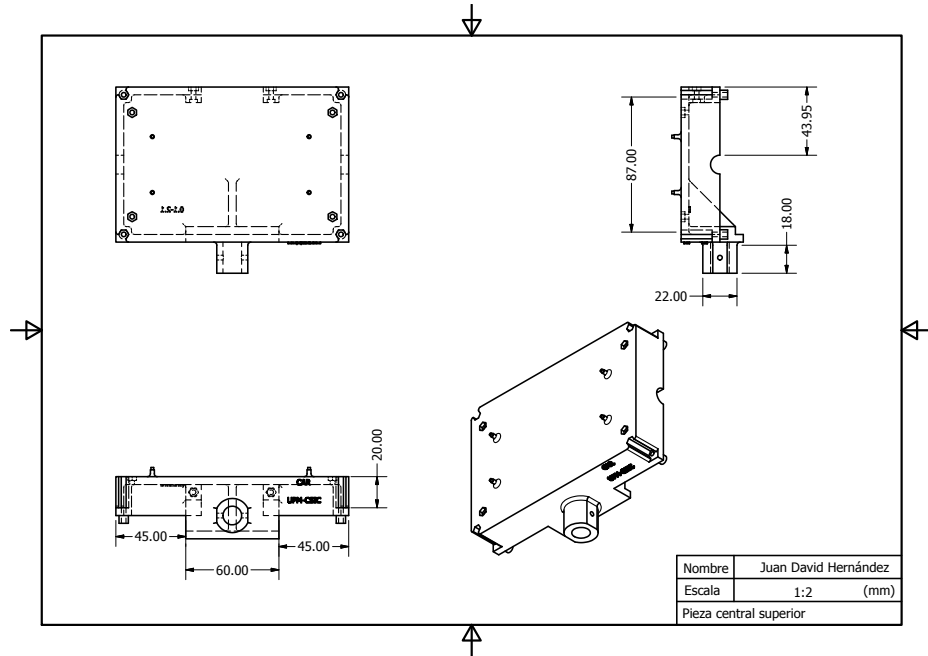


Figura D.4: Parte superior de la pieza central de ROSPHERE v0.1. Sobre ésta se ubica el soporte del actuador del primer GdL (ver Figura D.5), la tarjeta principal RoboveroTM y el sistema de cómputo embebido Overo Fire[®].

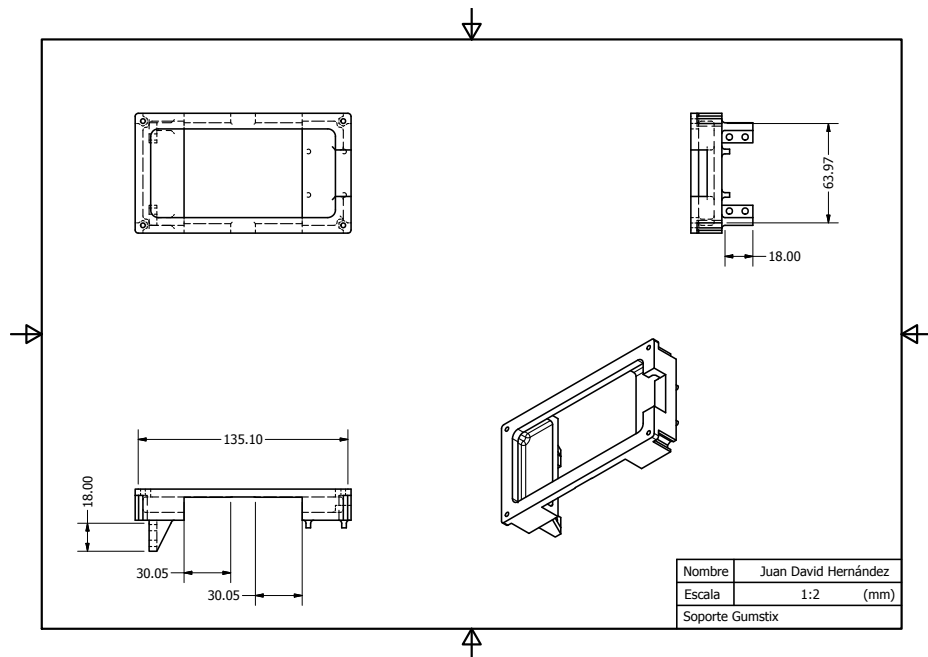


Figura D.5: Soporte del actuador del primer GdL de ROSPHERE v0.1.

D. PLANOS DE PIEZAS DE PLÁSTICO DE LOS PROTOTIPOS

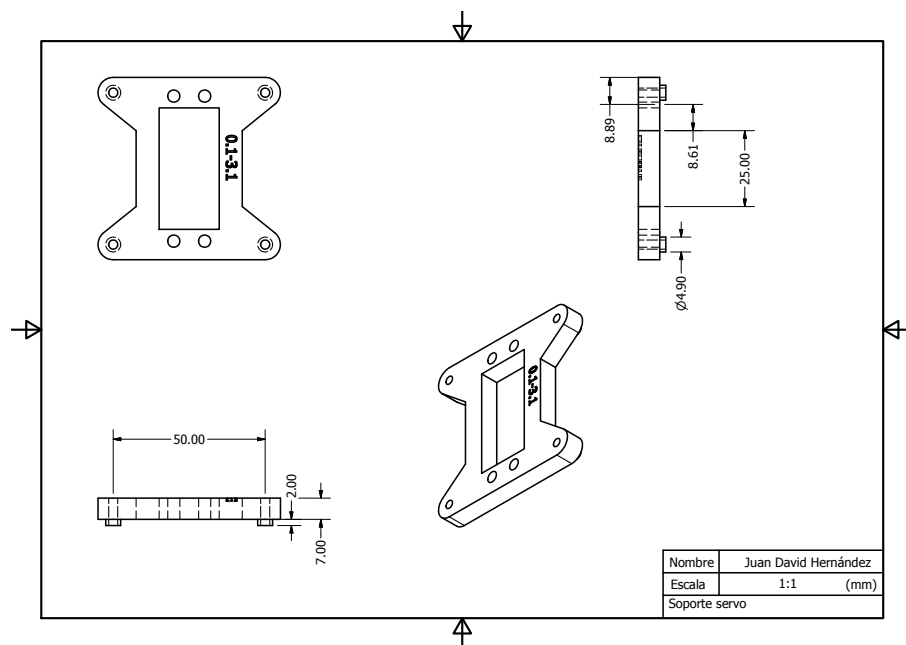


Figura D.6: Sujeción-Servo2 ROSPHERE v0.1. Pieza para sujetar el servomotor del segundo GdL.

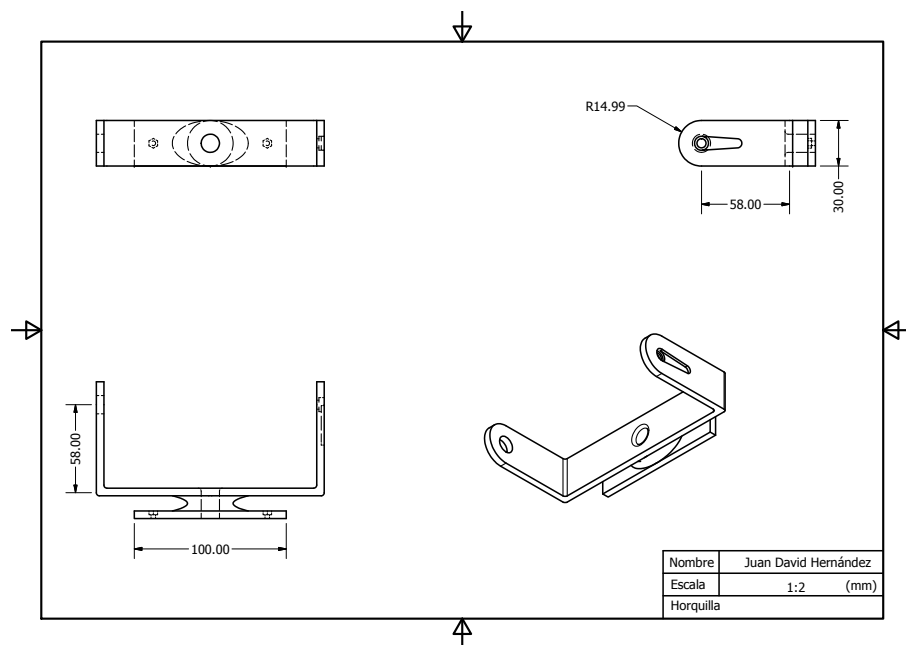


Figura D.7: Horquilla ROSPHERE v0.1. Pieza de la cual cuelga la caja de masa pendular (ver Figura D.8) y gira respecto a la pieza central (ver Figuras D.3 y D.4) según lo define el segundo GdL.

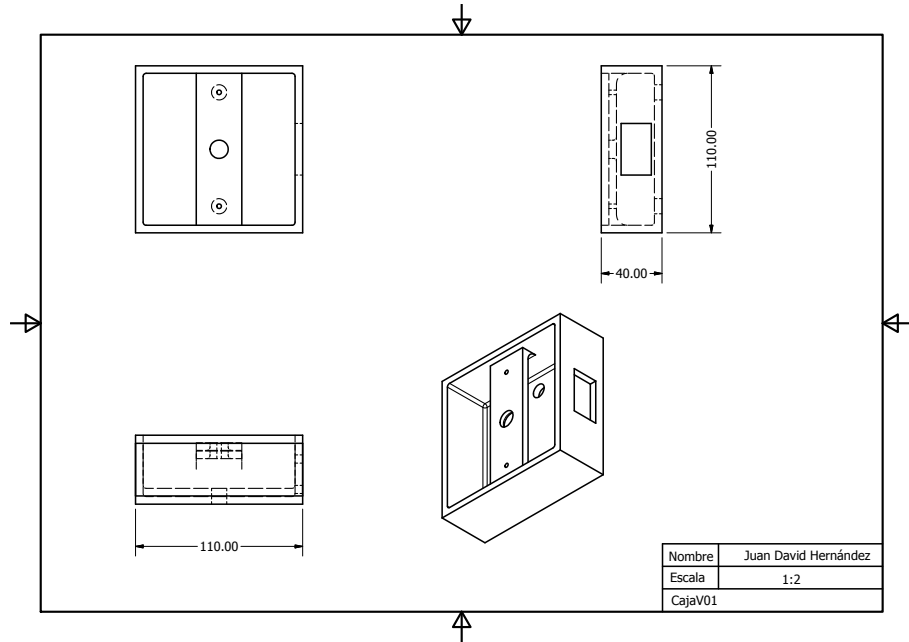


Figura D.8: Caja de masa pendular ROSPHERE v0.1. En ésta se ubican la batería del robot y masas adicionales que permiten alejar el Centro de Masa del sistema, respecto a su Centro Geométrico.

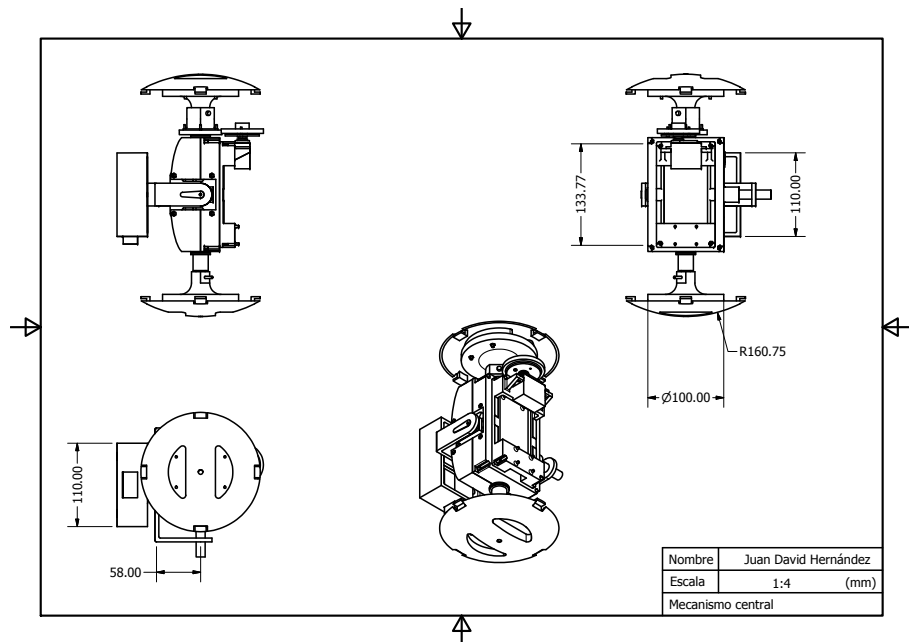


Figura D.9: Mecanismo interno completo de ROSPHERE v0.1.

D. PLANOS DE PIEZAS DE PLÁSTICO DE LOS PROTOTIPOS

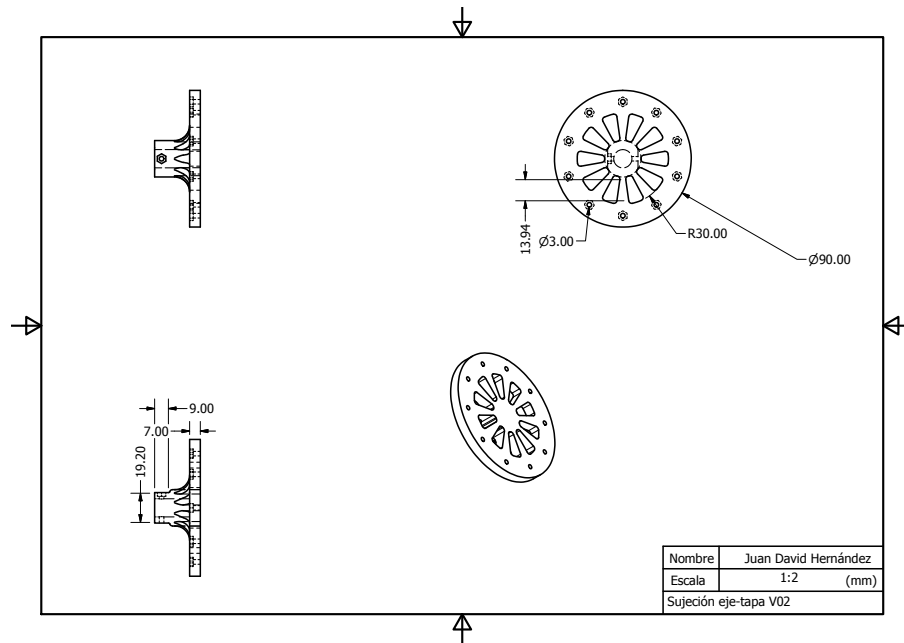


Figura D.10: Sujeción Eje-Esfera ROSPHERE v0.2. Pieza que permite sujetar cada extremo del eje principal al cuerpo esférico. El material, y en consecuencia la masa, ha sido disminuido respecto a la versión 0.1 con el objetivo de alejar el Centro de Masa del robot.

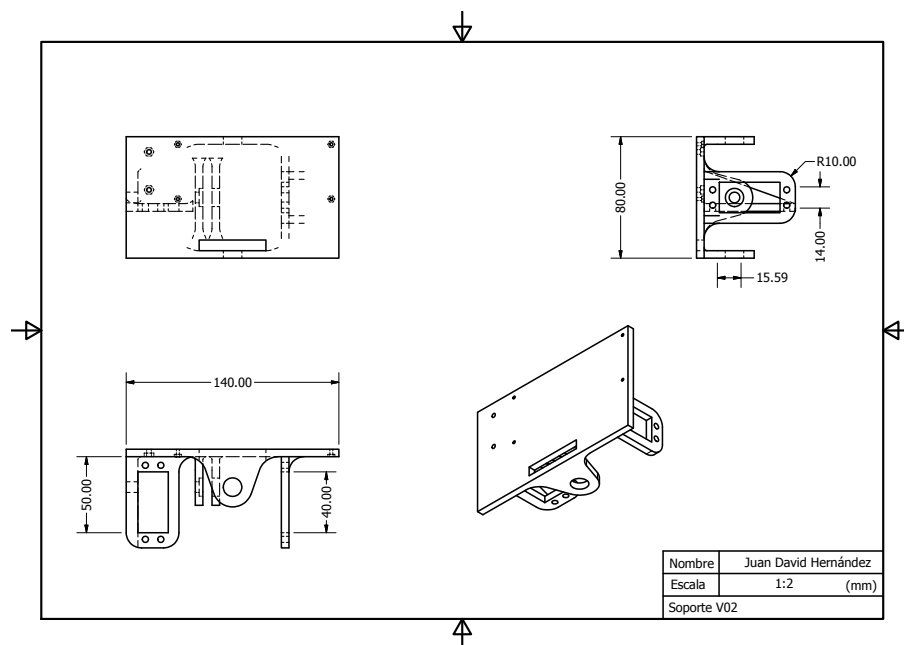


Figura D.11: Pieza central de ROSPHERE v0.2. Sobre ésta se ubican los dos actuadores del robot, la tarjeta principal Robovero™ y el sistema de cómputo embebido Overo Fire®.

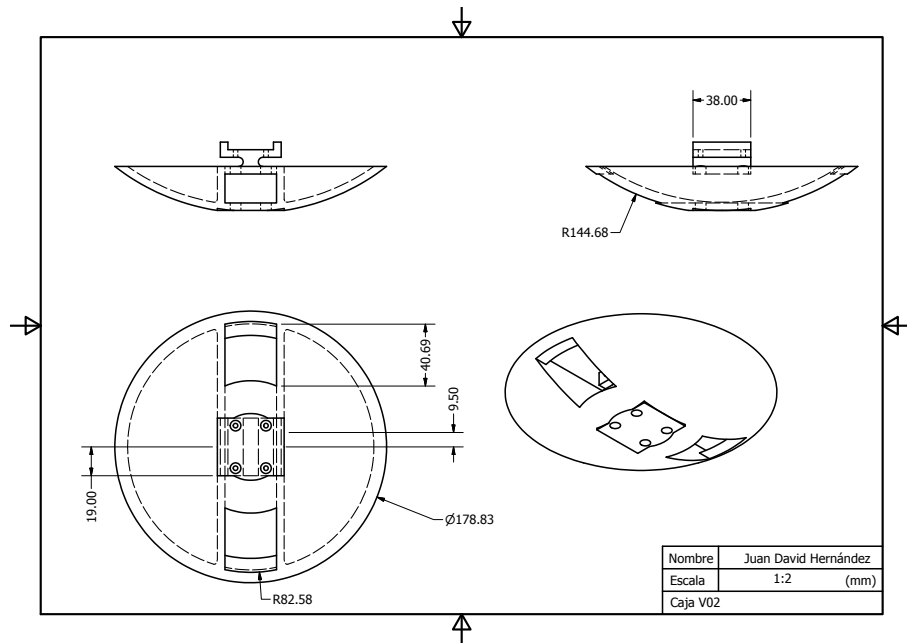


Figura D.12: Masa pendular ROSPHERE v0.2. En ésta se ubican la batería del robot y masas adicionales que permiten alejar el Centro de Masa del sistema, respecto a su Centro Geométrico. Su forma hace que el CM esté más cerca del extremo interior del cuerpo esférico del robot.

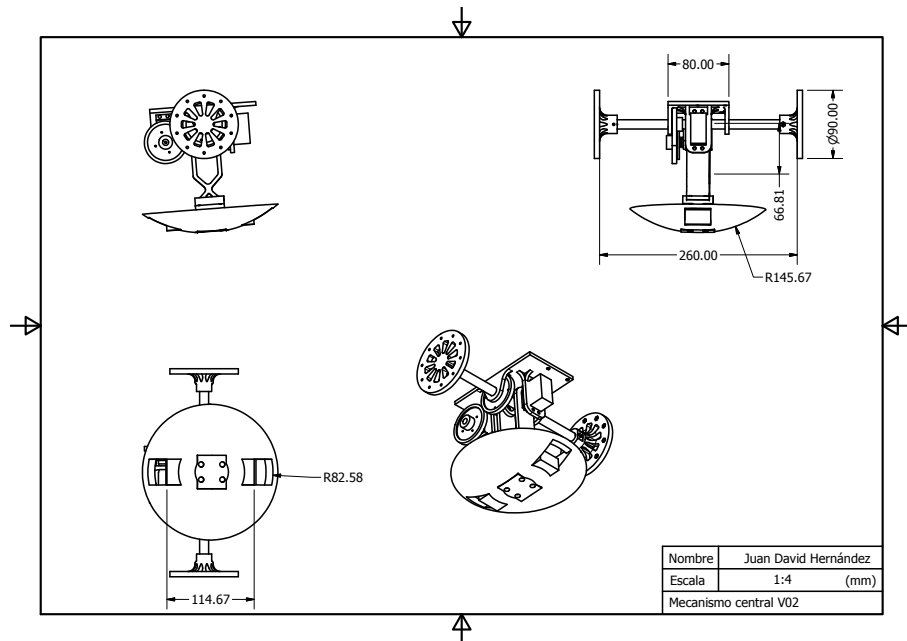


Figura D.13: Mecanismo interno completo de ROSPHERE v0.2.

D. PLANOS DE PIEZAS DE PLÁSTICO DE LOS PROTOTIPOS

Referencias

- [1] BIAO ZHANG, C MARTINEZ, JIANJUN WANG, T FUHLBRIGGE, W EAKINS, AND HEPING CHEN. **The challenges of integrating an industrial robot on a mobile platform.** In *Automation and Logistics (ICAL), 2010 IEEE International Conference on*, pages 255–260, July 2010. 1
- [2] A A F NASSIRAEI, Y KAWAMURA, A AHRARY, Y MIKURIYA, AND K ISHII. **A New Approach to the Sewer Pipe Inspection: Fully Autonomous Mobile Robot "KAN-TARO**. In *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, pages 4088–4093, August 2006. 1
- [3] MATTIAS SEEMAN, MATHIAS BROXVALL, ALESSANDRO SAFFIOTTI, AND PETER WIDE. **An autonomous spherical robot for security tasks.** In *Computational Intelligence for Homeland Security and Personal Safety, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on*, pages 51–55, 2006. 1, 15, 24
- [4] G RANDELLI, L IOCCHI, AND D NARDI. **User-friendly security robots.** In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2011 IEEE International Symposium on*, pages 308–313, 2011. 1
- [5] MATTHEW DUNBABIN AND LINO MARQUES. **Robots for Environmental Monitoring: Significant Advancements and Applications.** *IEEE Robotics & Automation Magazine*, **19**(1):24–39, March 2012. 2
- [6] FRANÇOIS MICHAUD, JEAN DE LAFONTAINE, AND SERGE CARON. **A Spherical Robot for Planetary Surface Exploration.** In *Proceeding of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence and Robotics & Automation in Space*, 2001. 2, 15, 24
- [7] E ROHMER, G REINA, G ISHIGAMI, K NAGATANI, AND K YOSHIDA. **Action planner of hybrid leg-wheel robots for lunar and planetary exploration.** In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 3902–3907, 2008. 2
- [8] FREDRIK C BRUHN, HENRIK KRATZ, JOHAN WARELL, CLAES-INGVAR LAGERKVIST, VIKTOR KAZNOV, JACK A JONES, AND LARS STENMARK. **A preliminary design for a spherical inflatable microrover for planetary exploration.** *Acta Astronautica*, 2008. 2, 16, 24, 25, 28
- [9] FRANÇOIS MICHAUD, JEAN-FRANÇOIS LAPLANTE, HÉLÈNE LAROCHE, AUDREY DUQUETTE, SERGE CARON, DOMINIC LÉTOURNEAU, AND PATRICE MASSON. **Autonomous spherical mobile robot for child-development studies.** *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, **35**(4):471–480, 2005. 2, 15, 25
- [10] J L JONES. **Robots at the tipping point: the road to iRobot Roomba.** *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, **13**(1):76–78, 2006. 2
- [11] ROLAND SIEGWART AND ILLAH R NOURBAKSH. *Introduction to Autonomous Mobile Robots (Intelligent Robotics and Autonomous Agents series)*. The MIT Press, March 2004. 2
- [12] R SILVA, J GARCÍA, V BARRIENTOS, AND M MOLINA. **Una panorámica de los robots móviles.** *Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*, **6**, 2007. 2
- [13] A.D KUO. **Choosing Your Steps Carefully.** *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, **14**(2):18–29, June 2007. 2
- [14] PABLO GONZALEZ DE SANTOS, ELENA GARCIA, AND JOAQUIN ESTREMER. *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots*. Springer, 1 edition, 2006. 2
- [15] FARBOD FAHIMI. *Autonomous Robots: Modeling, Path Planning, and Control*. Springer, 1st edition, 2009. 2
- [16] THOMAS BRÄUNL. *Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems*. Springer, 2nd edition, 2008. 2
- [17] QIANG ZHAN, CHUAN JIA, XIAOHUI MA, AND MING CHEN. **Analysis of moving capability of a spherical mobile robot.** *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005. 3
- [18] HYOK-JO KWON, HYUNGWON SHIM, DOO-GYU KIM, SUNG-KOOK PARK, AND JIHONG LEE. **A development of a transformable caterpillar equipped mobile robot.** In *Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS '07. International Conference on*, pages 1062–1065, 2007. 3
- [19] G MUSCATO, D CALTABIANO, S GUCCIONE, D LONGO, M COLTELLI, A CRISTALDI, E PECORA, V SACCO, P SIM, G S VIRK, P BRIOLE, A SEMERANO, AND T WHITE. **ROBOVOLC: a robot for volcano exploration result of first test campaign.** *Industrial Robot: An International Journal*, **30**(3):231–242, 2003. 3
- [20] SH KH SOLTAKHANOV AND MIKHAIL YUSHKOV. *Mechanics of non-holonomic systems: A New Class of control systems*. Springer, softcover reprint of hardcover 1st ed. 2009 edition, 2009. 2
- [21] MASAKI NAGAI. *Control system for a spherical robot*. Master's thesis, Luleå tekniska universitet, August 2008. 4, 20, 48
- [22] NASSIR WORKICHO OUMER. *Development of wireless control system for a spherical robot*. Master's thesis, HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2009. 4
- [23] TOMI YLIKORPI, AARNE HALME, PETER JAKUBIK, JUSSI SUOMELA, AND MIKA VAINIO. **Biologically inspired solutions for robotic surface mobility.** In *Proceedings of 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation*, pages 2–4, 2004. 5, 16
- [24] GONZALO RUY RODRIGUEZ CANOSA, ANTONIO BARRIENTOS, AND JAIME DEL CERRO. **Caracterización de las infraestructuras críticas de exteriores y su influencia sobre sistemas de vigilancia robóticos.** Technical report, 2011. 5

REFERENCIAS

- [25] V A CROSSLEY. **A literature review on the design of spherical rolling robots.** *Pittsburgh, PA*, 2006. 13, 19
- [26] RHODRI H ARMOUR AND JULIAN F V VINCENT. **Rolling in nature and robotics: A review.** *Journal of Bionic Engineering*, **3**(4):195–208, 2006. 13, 19
- [27] AARNE HALME, TORSTEN SCHÖNBERG, AND YAN WANG. **Motion control of a spherical mobile robot.** In *Advanced Motion Control, 1996. AMC '96-MIE. Proceedings., 1996 4th International Workshop on*, pages 259–264, 1996. 13, 21, 46, 48
- [28] AARNE HALME, JUSSI SUOMELA, TORSTEN SCHÖNBERG, AND YAN WANG. **A Spherical Mobile Micro-Robot for Scientific Applications.** *Proceedings of the 4th ESA Workshop on ASTRA*, 1996. 13
- [29] ANTONIO BICCHI, ANDREA BALLUCHI, DOMENICO PRATTICHIZZO, AND ANDREA GOREUJ. **Introducing the “SPHERICLE”: an experimental testbed for research and teaching in nonholonomy.** *Introducing the “SPHERICLE” : an Experimental Testbed for Research and Teaching in Nonholonomy*, **3**:2620–2625, 1997. 14, 21
- [30] CARLO CAMICIA FAHIO CONTICELLI ANTONIO BICCHI. **Nonholonomic kinematics and dynamics of the sphericle.** *Intelligent Robots and Systems, 2000.(IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on*, **1**:805–810, 2000. 14, 21, 46
- [31] J ALVES AND J DIAS. **Design and control of a spherical mobile robot.** *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, **217**(6):457–467, 2003. 15, 23
- [32] FRANÇOIS MICHAUD AND SERGE CARON. **Roball, the Rolling Robot.** *Autonomous Robots*, **12**(2):211–222, 2002. 15
- [33] FRANÇOIS MICHAUD AND SERGE CARON. **Roball, the Rolling Robot.** *Autonomous Robots*, **12**(2):211–222, February 2002. 15, 25
- [34] JEAN-FRANÇOIS LAPLANTE. *Etude de la Dynamique D’un Robot Spherique et de son effet sur L’attention et la Mobilité de Jeunes Enfants.* Master’s thesis, UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, Sherbrooke (Québec), Canada, August 2004. 15, 46, 48
- [35] JEAN-FRANÇOIS LAPLANTE, PATRICE MASSON, AND FRANÇOIS MICHAUD. **Analytical Longitudinal and Lateral Models of a Spherical Rolling Robot.** Technical report, Canada, 2007. 15, 22
- [36] MATTIAS SEEMAN, MATHIAS BROXVALL, AND ALESSANDRO SAFIOTTI. **Virtual 360,6° Panorama for Remote Inspection.** In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, 2007. 15, 24, 25
- [37] DALIANG LIU, HANXV SUN, QINGXUAN JIA, AND LIANGQING WANG. **Motion control of a spherical mobile robot by feedback linearization.** In *Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on*, pages 965–970, 2008. 15, 23, 46
- [38] DALIANG LIU, HANXV SUN, AND QINGXUAN JIA. **Stabilization and Path Following of a Spherical Robot.** In *Robotics, Automation and Mechatronics, 2008 IEEE Conference on*, pages 676–682, 2008. 15, 22, 23
- [39] QINGXUAN JIA, HANXV SUN, AND DALIANG LIU. **Analysis of Actuation for a Spherical Robot.** In *Robotics, Automation and Mechatronics, 2008 IEEE Conference on*, pages 266–271, 2008. 15, 22, 46
- [40] QIANG ZHAN, TINGZHI ZHOU, MING CHEN, AND SANLONG CAI. **Dynamic trajectory planning of a spherical mobile robot.** In *Robotics, Automation and Mechatronics, 2006 IEEE Conference on*, pages 1–6, 2006. 15, 22, 23, 46
- [41] QIANG ZHAN, LIU ZENGBO, AND CAI YAO. **A back-stepping based trajectory tracking controller for a non-chained nonholonomic spherical robot.** *Chinese Journal of Aeronautics*, **21**(5):472–480, 2008. 15, 22, 23
- [42] QIANG ZHAN, YAO CAI, AND ZENGBO LIU. **Near-Optimal Trajectory Planning of a Spherical Mobile Robot for Environment Exploration.** In *Robotics, Automation and Mechatronics, 2008 IEEE Conference on*, pages 84–89, 2008. 15, 22, 23
- [43] YAO CAI, QIANG ZHAN, AND CAIXIA YAN. **Two-state trajectory tracking control of a spherical robot using neurodynamics.** *Robotica*, pages 1–9, June 2011. 15, 22, 46
- [44] AMIR HOMAYOUN JAVADI A AND PUYAN MOJABI. **Introducing August: A Novel Strategy for An Omnidirectional Spherical Rolling Robot.** *Proceedings- IEEE International Conference on Robotics and Automation*, **4**:3527–3533, 2002. 18, 21
- [45] SAND SHENGJU, ZHAO JICHAO, WU HAO, CHEN SHOUJUN, AND AN QI. **Modeling and simulation of a spherical mobile robot.** *Computer Science and Information Systems/ComSIS*, **7**(1):51–62, 2010. 18, 22
- [46] ATSUSHI KOSHIYAMA AND KAZUO YAMAFUJI. **Design and Control of an All-Direction Steering Type Mobile Robot.** *The International Journal of Robotics Research*, **12**(5):411–419, October 1993. 20, 46, 48
- [47] ERKAN KAYACAN, ZEKI BAYRAKTAROGU, AND WOUTER SAEYS. **Modeling and control of a spherical rolling robot: a decoupled dynamics approach.** *Robotica*, pages 1–10, August 2011. 20, 22, 23, 46
- [48] RANJAN MUKHERJEE, MARK A MINOR, AND JAY T PUKRUSHPAN. **Simple motion planning strategies for spherobot: a spherical mobile robot.** *Decision and Control, 1999. Proceedings of the 38th IEEE Conference on*, **3**:2132–2137, 1999. 22
- [49] RANJAN MUKHERJEE, MARK A MINOR, AND JAY T PUKRUSHPAN. **Motion planning for a spherical mobile robot: Revisiting the classical ball-plate problem.** *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **124**:502, 2002. 22
- [50] M. SVININ AND S. HOSOE. **Motion planning algorithms for a rolling sphere with limited contact area.** *Robotics, IEEE Transactions on*, **24**(3):612–625, 2008. 23
- [51] ROY FEATHERSTONE. *Rigid Body Dynamics Algorithms.* Springer, 1 edition, November 2007. x, 41, 85

REFERENCIAS

- [52] JACQUES DENAVIT AND RICHARD S. HARTENBERG. **A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices.** *ASME Journal of Applied Mechanisms*, **23**:215–221, 1955. 41, 45
- [53] JOHN J CRAIG. *Introduction to Robotics, Mechanics & Control*. Addison-Wesley, 1986. 41, 45
- [54] RAYMOND A SERWAY AND JOHN W JEWETT. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Brooks/Cole, seventh edition, June 2007. 81, 84